

جان هلاديك

نسبية آينشتاين

ترجمة
هاني حداد

علوم 2

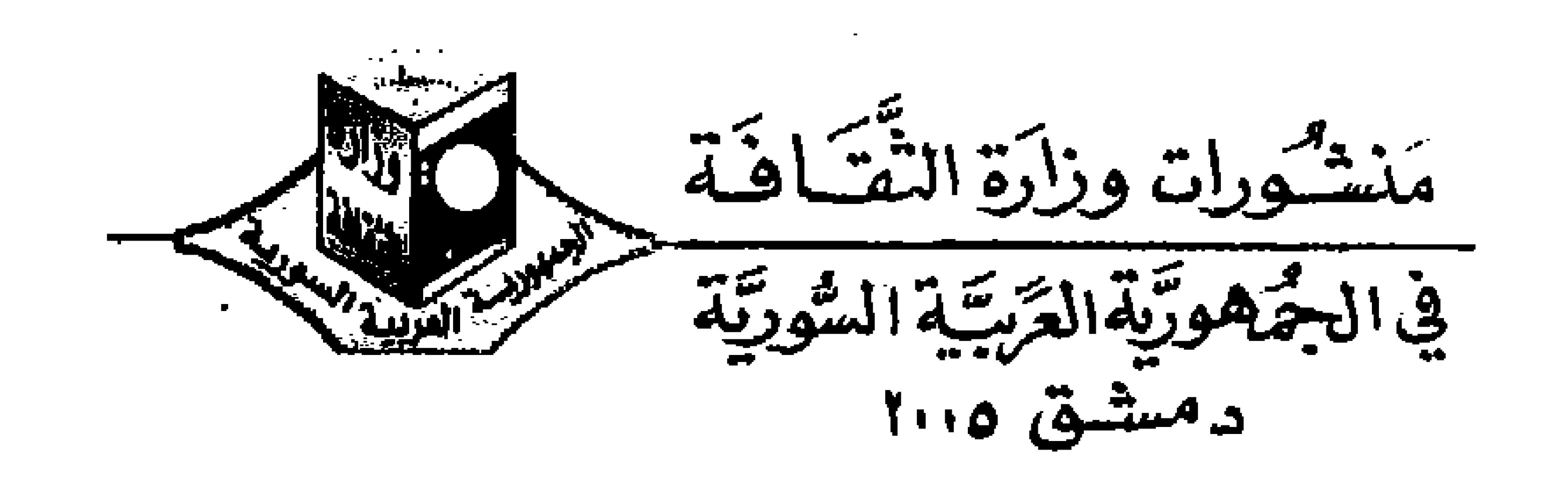
نسبيّة آينشتاين

جان هلاديك

نسبيّة آينشتاين

ترجمة

هاني حداد



منشورات وزارة الثقافة
في الجمهورية العربية السورية
دمشق ٢٠٠٥

العنوان الأصلي للكتاب:

LA RELATIVITÉ SELON EINSTEIN

JEAN HLADIK

نسبية آينشتاين = La relativité selon Einstein / جان هلاديك ؛ ترجمة هاني حداد .- دمشق : وزارة الثقافة ، ٢٠٠٥ .- ١٣٦ ص ؛ ٢٤ سم .- (علوم ؛ ٢)

١- ٥٣٠,١ هـ ل ا ن ٢- العنوان ٣- هلاديك

٤- حـداد ٥- السلسلة

مكتبة الأسد

علوم

«٢»

الكتاب والمؤلف

نسبية أينشتاين

الكتاب

بعد قرن تقريباً من نشر نظرية النسبية الخاصة نشر «جان هلاديك» هذا الكتاب الموجّه إلى جمهور واسع من غير المختصين والبعيد عن التعمق في الدراسات الرياضية.

يمهّد المؤلّف بالعودة إلى مبادئ الميكانيك كما وضعها غاليلي ونيوتن ويعرض التناقضات الفيزيائية التي جعلت ظهور النظريات الجديدة في مطلع القرن العشرين أمراً حتمياً، ومن هذه النظريات النظرية الكمومية، والنظرية النسبية الخاصة التي تتضمّن ثبات سرعة الضوء ونسبية الزمن.

وبعد عرض هذه النظرية يعرض نتائجها ومنها إمكان تحوّل الكتلة إلى طاقة، مما جعل الحصول على الطاقة النووية على حساب اختفاء الكتلة ممكنًا.

ينتقل المؤلف بعد ذلك إلى نظرية ثورية أخرى هي الميكانيك الكمومي والتي برزت فيها أسماء دوبروي وهايزنبرغ وشرودنغر وديراك وغيرهم في العقد الثالث من القرن العشرين، ليربط بينها وبين النظرية النسبية الخاصة ثم يعرض النسبية العامة التي استند فيها أينشتاين على أسس رياضية جديدة هي هندسة رايمان.

وينهي كتابه بتطبيق النسبية العامة علي الكون مستعرضًا الاكتشافات الكونية التي ظهرت في أواخر القرن العشرين والتي تؤيد صحة هذه النظرية.

المؤلف: جان هلاديك أستاذ للفيزياء في جامعة أنجيه Angers- فرنسا واشتهر بغزارة مؤلفاته التي نذكر منها بالإضافة إلى هذا الكتاب المنشور عام ٢٠٠٠ .

مقدّمة في النسبية الخاصة	(٢٠٠١)
اللفّافات (السبينور) في الفيزياء	١٩٩٩
طاقة الرياح	١٩٨٤
الانتقال في الكهرليتات الصلبة	(تاريخ النشر غير معروف)
فيزياء الكهرليتات	(تاريخ النشر غير معروف)
تشريح الذرّات	١٩٩٩
الميكانيك الكمومي- الذرات والجزيئات	١٩٩٧
الحساب التنسوري في الفيزياء (الطبعة الثالثة)	١٩٩٩

المترجم

مقدّمة

خلال القرن العشرين أحدثت نظريتان ثوريتان هما : النسبية، والميكانيك الكمومي تغييراً جذريًا في الفيزياء الأساسية .

كان ألبرت أينشتاين (١٨٧٩ - ١٩٥٥) من المؤسّسين العباقرة لهاتين الثورتين. إنه المؤسّس الرئيسي للنسبية الخاصّة، والمؤسّس الوحيد للنسبية العامة، ولكنه أسهم أيضًا في تأسيس الفيزياء الكمومية بتوسيعه لمفهوم ماكس بلانك عن الكّم. وتطبيق مفهوم كمّ الطاقة على الضوء جعل أينشتاين يفوز بجائزة نوبل في الفيزياء عام ١٩٢١ .

في عام ١٩٠٥ نشر أينشتاين، وكان عمره ٢٦ سنة، خمسة أبحاث عالجت عدداً من المواضيع بأسلوب جديد تمامًا. يدور البحث الأول حول تحديد الأبعاد الجزيئية، ويستخدم البحث الثاني مفهوم الكمّ لدراسة الفعل الكهرضوئي، ووضع البحث الثالث أسس النظرية الإحصائية للحركة البراونية .

أما البحثان الأخيران، فقد عبّرا عن أسس النظرية الثورية التي سيطلق عليها فيما بعد اسم «النسبية الخاصة». وقد نَشر هذين البحثين في مجلة حوليّات الفيزياء الألمانية وهما يحملان العنوانين التاليين : **حول الكهرباء التحريكية للأجسام المتحركة وهل تتعلّق عطالة الجسم بمحتواه من الطاقة؟**

عندما ظهرت هذه الأبحاث كان أينشتاين يعمل مهندسًا منذ عام ١٩٠٢ في مكتب المخترعات في برن عاصمة سويسرا. وهكذا لم تكن أبحاثه النظرية التي أجراها في تلك المرحلة ذات صلة بعمله. ولا شك في أن إحداث هذه

الانقلابات العميقة في الفيزياء الأساسية يدلّ على قدرات غير عادية لشابّ عمره ٢٦ سنة.

تتعلق هذه الانقلابات بالأسس التي بنيت عليها الفيزياء التقليدية. الزمان والمكان. وبإثبات أن الزمان والمكان ليسا مطلقين كان لأينشتاين أيضًا تأثير عميق على الفكر الفلسفي وذلك بالتشكيك في مفهوم «كنط» عن الأطر **المحدّدة مسبقًا** للزمان والمكان.

هذا الجزء الأول من نظرية أينشتاين، والذي يدعى النسبية الخاصة، هو موضوع الفصول الخمسة الأولى من هذا الكتاب. ومع أن التعبير عن مبادئ النسبية الخاصة بسيط إلا أن إدراكها يحتاج إلى بعض البراهين الرياضية، ولكننا سنلاحظ عند قراءتنا أن متابعة هذه البراهين لايحتاج في الحساب إلا إلى العمليات الأساسية، ولايحتاج في الهندسة إلا إلى معرفة نظرية فيثاغورس. ولاشك في أن الدراسة الموسعة للنظرية تحتاج إلى أدوات رياضية أخرى ولكن جوهر النسبية الخاصة أي المفاهيم الأساسية موجودة في هذه الفصول الخمسة الأولى. وسنرى من جهة أخرى أن تطبيقات النسبية الخاصة شاعت في مجالات كثيرة من الفيزياء التجريبية.

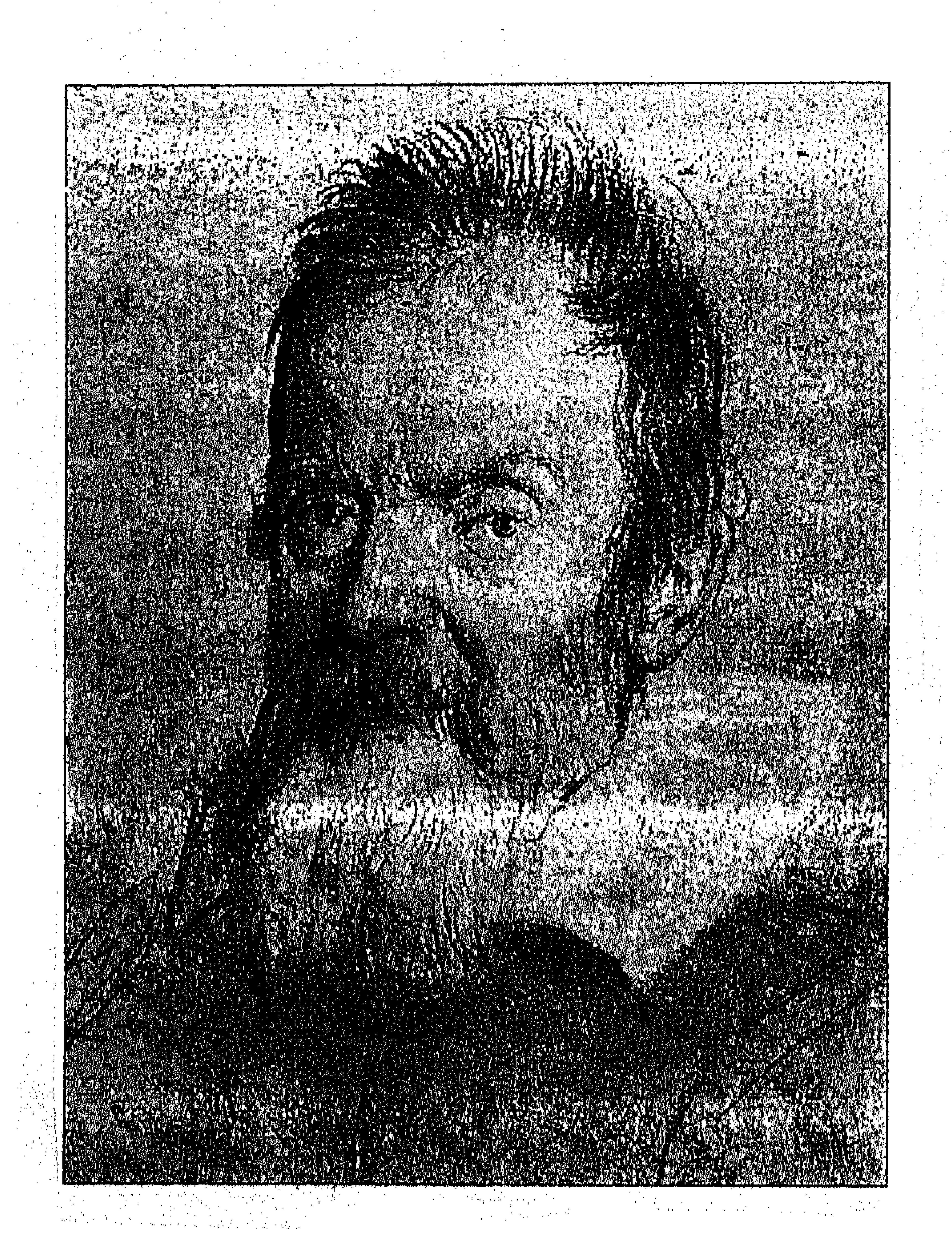
بعد ذلك تابع أينشتاين أبحاثه لتطبيق مبادئ النسبية على الجمل المتسارعة والثقالية. وهكذا طوّر نظرية واسعة جداً تنطبق على مجالات فيزيائية متعدّدة، وهي بالإضافة إلى ذلك نظرية من نمط جديد تمامًا اقترحها أينشتاين. وبينما تدرس الفيزياء التقليدية جملاً مادّية ضمن إطار مكاني مطلق، وضع أينشتاين نظرية للإطار نفسه والمرتبط ارتباطًا وثيقًا بمحتواه المادّي.

هذا الجزء من أعماله، والذي يدعى النسبيّة العامة احتاج إلى قرابة عشر سنوات من العمل المكثف. كان بحاجة إلى تمثّل نظريات رياضية حديثة كحساب

الكميّات الممتدّة (الحساب التنسوري) وهندسة رايمان للوصول إلى صياغة المبادئ الفيزيائية الجديدة التي اكتشفها.

نشر النسبية العامة عام ١٩١٦ في **حوليات الفيزياء** تحت عنوان: **أسس النظرية النسبية العامة**. كان أينشتاين قد حسب في هذا المقال مقداراً يختبر فيه هذه النظرية الجديدة، وهذا المقدار هو زاوية انحراف الأشعة الضوئية الصادرة عن نجم عند مرورها بجوار الشمس. نجاح هذا الاختبار جعل أينشتاين يشتهر عالميًّا بسرعة. أجريت فيما بعد اختبارات أخرى أثبتت كلها صحة النسبية العامة. أجريت اختبارات تحقق أكثر دقة وكان بعضها حديثًا باستخدام مسبارات الفضاء.

وضعت النسبية العامة مفهومًا جديداً لا يمكن بموجبه الفصل بين المادة والزمان والمكان. الفصول الأربعة الأخيرة تعرض النسبية العامة، وهي تقدّم المبادئ الجديدة التي وضعها أينشتاين بأسلوب يسهل فهمه. وقد عرضنا لمحة عن هندسة رايمان التي أثبت أينشتاين أنها يجب أن تحلّ محلّ الهندسة التقليدية عند دراسة الكون. والنسبية العامة هي الآن النظرية الأساسية في دراسة علم الكون وفيزياء الكون. أدخلت الثورة النيوتنية مبادئ تبقى أساسية باستمرار إلا في حالة اقتراب سرعة الأجسام من سرعة الضوء أو عندما تصبح الكتل مجهرية. وأدخلت نظرية أينشتاين أيضًا مبادئ تشمل مبادئ نيوتن وستبقى مبادئ أساسية للفيزياء.



غاليله (١٥٦٤- ١٦٤٢)
مؤسّس الميكانيك

الـفـصــل الأول

نسـبيّـة غاليـله

لاشك في أن ألبرت أينشتاين (١٨٧٩-١٩٥٥) أحد أكبر العبقريات العلمية في القرن العشـــرين. ومع ذلك فإن القســـم الأول من أعماله، وهو النسبية الخاصة المنشـــور بدءاً من عام ١٩٠٥ كان تتويجًا لأعمال غنية جداً قام بها رياضيون وفيزيائيون في النصف الثاني من القـــرن التاسع عـــشر، وبخاصة هندريك لورنتز (١٨٥٣- ١٩٢٨) وهنري بوانكاريـــه (١٨٥٤- ١٩١٢). وفي العلوم علينا دائمًا أن نتذكر الملاحظـــة التي أبداها نيوتن حول أبحاث سابقيه التي استوحى منها:

لقد استطعت النظر إلى بعيد لأني كنت جالسًا على أكتاف عمالقة.

لابدّ أيضًا من العودة إلى ما قبل القرن التاسع عشر لنعرف نشوء نسبية أينشتاين فهي تستقي من ينابيع نسبية غاليله وميكانيك نيوتن. وهذا ما سنراه في هذا الفصل قبل دراستنا لنظرية أينشتاين.

عندما بدأت الأرض بالدوران

١- اختفاء مركز الكون

يبدأ تاريخ النسبية مع نيكولاس كوبرنيك (١٤٧٣- ١٥٤٣). في نظام بطليموس كان للكون مركز، هو الأرض، وكانت الظواهر الفلكية كلّها مرتبطة بهذا المركز الوحيد. وعندما قال كوبرنيك إن الأرض تدور حول الشمس ألغى مركز

العالم. وتلك خطوة أولى نحو إدراك أن اختيار نقطة لتكون مركزاً للإحداثيات في الفراغ هو أمر نسبي.

ثم اكتشف كبلر أن الكواكب تتحرك على قطوع ناقصة لا على دوائر. وهكذا لم تعد الشمس في مركز العالم بل في محرق القطع الناقص. وعندما لم يعد هناك مركز للعالم لم تعد هناك في الفراغ أية نقطة مفضّلة لتكون مركزاً للإحداثيات التي تدرس فيها حركة الكواكب. وهكذا، وبأسلوب ضمني، ولّدت ثورة كوبرنيك فكرة **الأوضاع النسبية** عند دراسة الظواهر الميكانيكية.

وخوفاً من ردّ فعل اللاهوتيين المعادي، لم ينشر كوبرنيك نظريته إلا قبل موته بقليل، فقد عرض نظامه في كتاب نشر عام ١٥٤٣ هو **دوران الأجرام السماوية**. ولكن منذ عام ١٥١٢ انتشرت على نطاق ضيق خلاصة مبادئ النظرية الجديدة.

٢- مبدأ مخالف للكتاب المقدّس

في عام ١٦١٦ أدان البابا بولس الخامس أفكار كوبرنيك بصفتها مناقضة للكتاب المقدّس. وهكذا أصبح من الخطر نشر مؤلفات تدافع عن نظام كوبرنيك. ومع ذلك دافع غاليله (١٥٦٤ - ١٦٤٢) عنه عندما نشر عام ١٦٢٣ كتابه: **حوار حول النظامين الكبيرين للكون**. في هذا الكتاب يجمع غاليله ببراعة وثقة الأدلة والاعتراضات والمناقشات التي جمعها وطوّرها خلال ٣٥ سنة. كان أستاذاً للرياضيات في بيزا، ثم في بادوفا حتى عام ١٦١٠. كان يدرّس كزملائه علم الكون التقليدي، ولكنه تحوّل بعد ذلك إلى آراء كوبرنيك، ومراسلاته تؤكّد ذلك. في رسالة مؤرخة في ٤ آب ١٥٩٧ مكتوبة باللاتينية التي كانت لغة علماء ذلك العصر، قال لكبلر:

... منذ عدّة سنوات صرت منحازاً إلى أفكار كوبرنيك، وبفضلها اكتشفت أسباب عدد كبير من الحوادث الطبيعية التي لم تدخلها الفرضية الشائعة في الحسبان.

رأت الكنيسة أن كتاب غاليله خطر ومثل غاليله أمام ديوان التفتيش والنتيجة معروفة جداً، في ٢٢ حزيران ١٦٣٣ أعلن غاليله التخلّي عن أفكاره لأن ديوان التفتيش:

... أعطاني الأمر بأن أتخلى عن الفكرة الخاطئة التي تقول: إن الشمس ساكنة وهي مركز الكون، وإن الأرض ليست مركز الكون وهي تتحرك وأمرني بألا أتمسك بهذه الفكرة الخاطئة، وألا أدافع عنها أو أعلّمها بالقول أو بالكتابة، بعد أن أعلمني أن الفكرة المذكورة مخالفة للكتاب المقدس (١).

وفي ٣١ تشرين الأول من عام ١٩٩١، أي بعد مرور أكثر من ثلاثة قرون ونصف على محاكمته أعاد البابا يوحنا بولس الثاني المكانة إلي غاليله، واعترفت الكنيسة أخيراً بأن الأرض تدور حول الشمس

مبدأ النسبية لدى غاليله

بعد كوبرنيك، جاءت الخطوة الثانية على طريق مفهوم النسبية ضمن أبحاث راهب دومينيكي إيطالي هو جوردانو برونو (١٥٤٨- ١٦٠٠) وبصورة أكثر دقّة ضمن أبحاث غاليله. وهكذا ظهر مفهوم النسبية الأساسي الذي طبّق أولاً على الميكانيك التقليدي ثم توسّع ليشمل القوانين الفيزيائية كلّها.

---

(١) غاليله: حوار حول النظامين الكبيرين في الكون.

١- عندما تمرّ المراكب

أوضح جوردانو برونو، بما يشبه أسلوبنا المعاصر، مفهوم الجملة الميكانيكية وعارض أفكار معاصريه من الفلاسفة. شرح برونو أفكاره باستخدام مثال هو سقوط حجر من أعلى سارية مركب. إذا كان المركب مربوطًا بالرصيف، أي ساكنًا بالنسبة إلى هذا الرصيف فإن الحجر سيسقط دون شك عند قاعدة السارية.

عندما يتحرك المركب في البحر بسرعة ثابتة، وبفرض عدم وجود حركات أخرى مثل ترنّح المركب أو تأرجحه، أين سيسقط الحجر؟

قد يخطر لنا بالبداهة أن مكان السقوط سيكون بعيداً عن قاعدة السارية بمسافة تساوي المسافة التي اجتازها المركب خلال زمن السقوط. ولكن وكما يؤكد برونو، انطلاقًا من هذا المثال الشهير في كتابه حوارات ميتافيزيائية:

الحجر الملقى من أعلى السارية سيسقط عند قاعدتها بصرف النظر عن حركة المركب.

تؤكد التجربة فعلاً أن الحجر يسقط دائمًا عند قاعدة السارية، وحركة الحجر كما يراها المشاهدون الموجودون على الشاطئ لن تكون على خط مستقيم شاقولي، وبما أن الحجر ينسحب مع حركة المركب فهو يمزج حركته الأفقية مع حركته الشاقولية ليصل دائمًا عند قاعدة السارية تمامًا.

توقفت أفكار برونو العلمية قبل أوانها لأن هذا المفكر المستقل دافع عن نظريات أخرى مخالفة لآراء الكنيسة، فأحالته إلى ديوان التفتيش الذي سجنه عام ١٥٩٣ ثم أحرقه حيًا في روما في ١٧ شباط من عام ١٦٠٠.

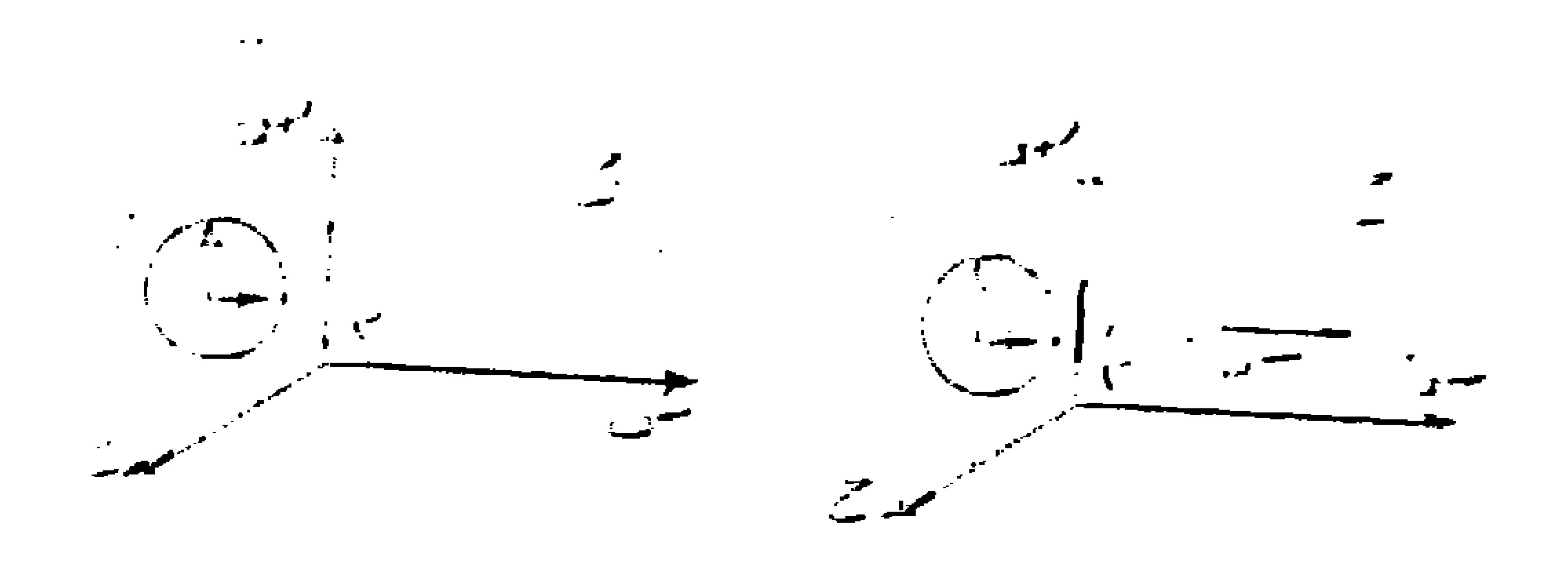
٢- هل المركب ساكن أم متحرك؟

غاليله الأكثر حذراً من برونو تابع دراسة الموضوع نفسه في كتابه **حوار**. عاد إلى مثال سقوط حجر من أعلى سارية مركب متحرك وأضاف بعض التجارب.

> **احبس نفسك مع صديق في أكبر مقصورة تحت سطح مركب كبير واصطحب معك عدداً من الذبابات والفراشات وغير ذلك من الحشرات الطائرة. خذ معك أيضًا حوضًا كبيراً مليئاً بالماء تسبح فيه بعض السمكات الصغيرة. علّق أيضًا دلواً صغيراً يقطر الماء من ثقب صغير في أسفله قطرة قطرة داخل وعاء آخر تحته. عندما يكون المركب ساكنًا لاحظ بعناية أن الحشرات الصغيرة الطائرة تتحرك بالسرعة نفسها في مختلف الاتجاهات داخل المقصورة، وأن السمكات تسبح في مختلف الاتجاهات، وأن قطرات الماء تسقط دائماً داخل الوعاء الموجود في الأسفل [...] دع المركب يتحرّك بالسرعة التي تريدها على أن تبقى الحركة منتظمة ودون تأرجح إلى أحد الاتجاهين أو الاتجاه الآخر، ولن تلاحظ أي تغيّر في أي من النتائج التي ذكرناها، ولن تساعدك أي منها في معرفة إن كان المركب ساكنًا أو متحركًا.**

٣- نصّ مبدأ نسبية غاليله

نحتاج لدراسة الحوادث الفيزيائية إلى ما يسمّى جملة مقارنة. وهي مكونة من مجموعة إحداثيات محمولة على ثلاثة محاور متعامدة مثنى مثنى م س، م ع، م ص (شكل ١-١) وهي تستخدم لتحديد موضع كل نقطة في الفراغ، ونضيف إليها ميقاتية لمعرفة الزمن. يطلق أيضاً على جملة المقارنة اسم **المرجع**.



شكل ١-١

في النسبية ندرس غالبًا مرجعين، يتحرك كلٌ منهما بالنسبة إلى الآخر بحركة انسحابية منتظمة. نستخدم تعبير انسحابية بمعنى حركة مستقيمة وسنستخدم فيما يلي هذا التعبير بهذا المعنى.

يطلق على المرجع المتحرك بحركة انسحابية منتظمة اسم **مرجع غاليلي**.

نرمز لمرجع مفروض بالرمز ج، وبالرمز جَ لمرجع آخر يتحرك بالنسبة إلى ج بحركة انسحابية منتظمة سرعتها سر (شكل ١-١) نرمز إلى المحاور المتعامدة في جَ بـ مَ سَ، مَ عَ، مَ صَ. نفرض دومًا أن المحورين م س ومَ سَ متطابقان. الزمن الذي تشير إليه الميقاتية المرتبطة بـ ج هو ز، والذي تشير إليه الميقاتية المرتبطة بـ جَ هو زَ. نفرض دائمًا أن نقطة المبدأ مَ تمر بالنقطة م عند اللحظة ز=زَ=٠.

سنعبّر فيمايلي عن النتيجة السابقة المتعلّقة بتجارب غاليله كما عبّر عنها نيوتن بعد بضعة عقود، وبعد وضعها ضمن صياغة حديثة.

يوجد عدد لامتناه من جمل المقارنة التي تتحرك بالنسبة إلى بعضها بعضًا بحركة انسحابية منتظمة، وقوانين الميكانيك التقليدي تكون متطابقة فيها كلّها.

هذا هو مبدأ النسبية المسمّاة نسبية غاليله، وللتعبير الرياضي عن هذا المبدأ سنعرّف ما يسمّى **تحويل غاليله.**

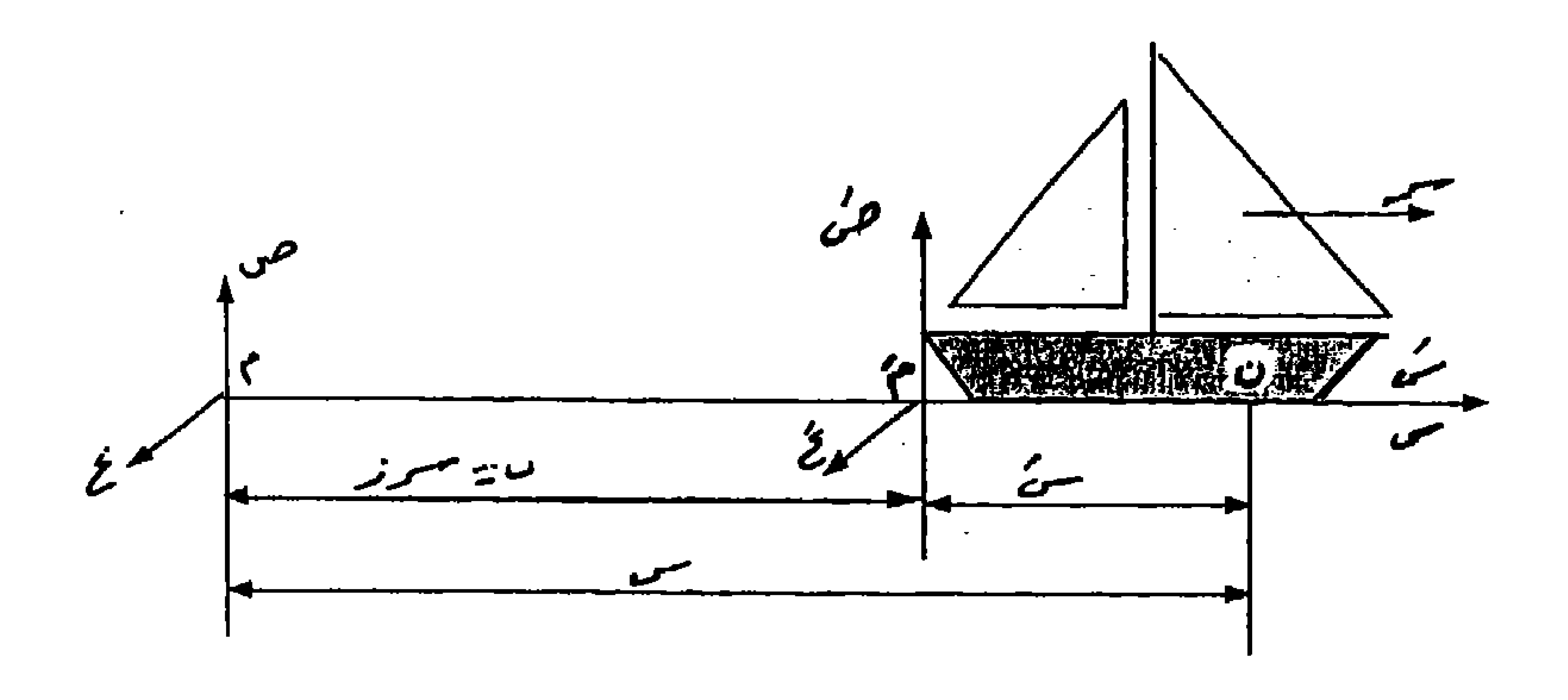
٤ - تحويل غاليله

نعود إلي مثال المركب الذي يتحرك بسرعة سر بالنسبة إلى الرصيف باتجاه م س متعامد مع الرصيف (شكل ١-٢) نرمز بالحرف مَ للنقطة الواقعة على الشاقول المار من مؤخرة المركب. نرمز لمسافة ما م ن بالرمز س وللمسافة مَن بالرمز سَ وإذا كانت ب هي المسافة م مَ فمن الواضح أن سَ = س- ب

نفرض أن النقطة مَ من المركب مرّت عند الزمن ز=٠ بالنقطة م. نفرض أنه احتاج إلى زمن ز لاجتياز المسافة ب بسرعة ثابتة سر، عندئذ ب =سرز

ندخل قيمة ب هذه في التعبير السابق عن سَ ونجد سَ =س- سرز

نربط الآن مرجعًا ج بالرصيف ومركزه م ومرجعًا آخر جَ بالمركب ومركزه مَ. نفرض أن الميقاتيتين في ج وجَ متطابقتان وتعملان بدقة. وهما أيضًا مضبوطتان على توقيت واحد. وبما أننا نثق في ميقاتيتينا فسيكون لدينا دائمًا ز =زَ.



شكل ١-٢

وأخيـراً نحصـل على العلاقـات التـالية بين الإحـداثـيات الفـراغـية والزمن في المرجعين :

سَ=س− سر ز ، عَ=ع ، صَ= ص ، زَ= ز

هذه العلاقات الأربع هي ما يدعى **تحويل غاليله**، وسمّيت كذلك لتكريم مؤسس الميكانيك التقليدي .

وفقًا للقانون الأساسي في التحريك، إذا أثرت قوة ق على جسم كتلة ك فإنه يكتسب تسارعًا تع متناسبًا مع القوة . نفرض أن هذه المقادير الثلاثة قد تمّ قياسها في المرجع ج ويكون لدينا ق =ك تع .

بتطبيق تحويل غاليله يمكن البرهنة على أن التسارع تعَ المقيس في مرجع جَ يتحرك بحركة انسحابية منتظمة بالنسـبة إلى ج سيكون مساويًا للتسارع تع وإذن ق=ك تعَ، وصيـاغـة قـانون التـحـريك هي نفسـهـا مـهـمـا كـان المرجع الغـاليلي المدروس . ونقـول إن قـانون التـحـريك **لامتغيّر** عندما نطبّق عليه تحويل غـاليله . وهكذا نستطيع التعبير عن مبدأ نسبية غاليله بشكل أكثر دقة :

قوانين الميكانيك التقليدي هي لامتغيّرات بالنسبة إلى تحويل غاليله

٥- القبطان يتنزّه على ظهر مركبه:

لنفرض الآن أن قبطان المركب يتنزه على الظهر بسرعة ثابتة سعَ. إذا انطلق من المؤخرة، أي من النقطة مَعند الزمن زَ= ٠ بالاتجاه مَسَ سيجتاز فوق مركبه بعد زمن زَ مسافة سَ حيث سَ= سعَ زَ

سنطرح الآن سؤالاً، لن نسأل عن عمر القبطان، بل نريد معرفة سرعته بالنسبة إلى الرصيف، أي سرعته بالنسبة إلى النقطة م. ولكن المسافة الكلية التي قطعها القبطان بالنسبة إلى الرصيف تساوي المسافة التي قطعها المركب، أي سر ز، مضافًا إليها المسافة التي قطعها القبطان على ظهر السفينة وهي سعَ زَ= سعَ ز والمسافة الكلّية تساوي المجموع:

س= سرز + سعَ ز = (سعَ+سر)ز

يمكن التحقق من أن هذه النتيجة تطابق تحويل غاليله، ولذلك وفي العلاقة

سَ= سعَ زَ نضع سَ= س- سرز و زَ= ز ونجد

س= (سعَ+ سر) ز

بعد زمن ز يكون بعد القبطان عن الرصيف هو س وسرعته إذن هي

سع= س/ز = سعَ + سر

أي سرعة انتقال القبطان بالنسبة إلى الرصيف تساوي مجموع السرعتين وهذا هو قانون جمع السرعات في نسبية غاليله، أي في الميكانيك التقليدي.

الضوء، موجة أم جسيمات؟

لسرعة الضوء أهمية أساسية جداً في نظرية أينشتاين النسبية،

وفي الحقيقة كانت تساؤلات العلماء حول طبيعة الضوء وانتشاره منطلقًا للنظرية النسبية.

١- سرعة الضوء

لم يبدأ العلماء بالتساؤل عن طبيعة الضوء قبل القرن السابع عشر، هل هو مادّة قائمة بذاتها أم لايخرج عن كونه حركة تنقلها مادة تملأ الفضاء؟ ومع أن علم الضوء التجريبي تطوّر منذ القرن الخامس عشر إلاّ أن أية نظرية عن طبيعة الضوء لم تظهر قبل ديكارت.

تصوّر رينيه ديكارت (١٥٩٦- ١٦٥٠) وجود عالم مليء بمادة غير قابلة للانضغاط تنقل بشكل آني تقريبًا «الضغط» الناتج عن الأجسام المضيئة وهكذا فإن النظريات التي اعتمدت على أفكار ديكارت نظرت إلى الضوء على أنه حركة وليس مادّة: إنه ليس جسمًا يتحرك بل هو حركة معيّنة داخل وسط يملأ الفراغ كلّه أطلقوا عليه اسم «الأثير».

كرّر اللاهوتي نيكولاس مالبرانش (١٦٣٨- ١٧١٥) أفكار ديكارت ولكنه أعطى للضغط الديكارتي صفة اهتزازية وقد استوحى ذلك من علم الصوت الذي كان متطوّرًا جدًا في عصره. فرض مالبرانش أن الاهتزازات الضوئية تحدث في الأثير إلي جانبي وضع متوسط باتجاه انتشار الضوء، وهي إذن اهتزازات طولانية، وهذا صحيح فيما يخصّ الصوت، ولكن ثبت فيما بعد أنه غير صحيح فيما يخص الضوء. فرض مالبرانش أن لكل لون ترددًا اهتزازيًا خاصًا به وهي فرضية صحيحة ولكن لم يهتمّ أحد بها حتى القرن التاسع عشر.

بدأت عندئذ فكرة انتشار الضوء بسرعة محدّدة بالظهور. بعد موت ديكارت بما لايزيد عن ٢٥ سنة أثبت أولايوس رومر (١٦٤٤- ١٧١٠) استناداً إلى رصد

خسوف أقمار المشتري أن الضوء ينتشر بسرعة معينة، وحسب هذه السرعة، وفي عام ١٦٧٦ حصل على قيمة تقريبية هي ٢١٤٠٠٠ كم/ ثا وكانت تلك أول فكرة عن القيمة الكبيرة جداً لهذه السرعة.

مرّ قرنان تقريباً قبل إجراء قياسات على سطح الأرض. ففي عام ١٨٤٩ أجرى هيبوليت فيزو (١٨١٩- ١٨٩٦) أوّل قياس مباشر لسرعة الضوء وجهاز القرص المسنّن الذي استخدمه فيزو أعطى قيمة للسرعة قريبة من ٣٠٠,٠٠٠كم/ ثا.

٢- الضوء يتحوّل إلى مادّة

كان الراهب اليسوعي فرانشسكو غريما لدي (١٦١٨- ١٦٦٣) أول من بذر بذور الشك في الطبيعة الحركية الصرفة للضوء. وفي كتابه **حول الضوء** الذي لم ينشر حتى عام ١٦٦٥ درس غريما لدي ظاهرة انعراج الضوء، هذه الظاهرة جعلته يفرض أن الضوء مادّة يمكن أن يكون انتشارها موجيّاً ولكن طبيعتها لايمكن أن تكون حركية صرفة.

ولكنّ نيوتن، وفي رسالة إلى الجمعية الملكية عام ١٦٧٢، اقترح نظرية مادّية صرفة للضوء. ولاشك في أنه في صياغته لنظريته كان شديد التأثر بعالم الميكانيك. وقبل أن يبدأ اهتمامه بالضوء كان قد درس بعناية قوانين تصادم الأجسام المرنة والتي يستطيع كلّ منا التحقق منها على طاولة البليارد. وفيما يخصّ الأجسام المحسوسة كان نيوتن يعرف أن زاوية الورود تساوي زاوية الانعكاس، ومن البديهي أنه كان يعرف أن هذا القانون نفسه ينطبق على انعكاس الضوء.

لم يكن عليه سوى تغيير بعض المفاهيم للوصول إلي نظرية جسيمية للضوء. وهذا ما فعله عندما تخيّل أن الضوء مؤلف من جسيمات صغيرة إلى حدّ لايمكن

إدراكه تطلقها الأجسام المضيئة بسرعة يصعب تصوّرها. وعندما تسقط هذه الجسيمات على سطح صقيل تمامًا تنعكس وفقًا للقوانين المألوفة للصدمات المرنة. وهكذا يبدو انعكاس الضوء كما لو أن الضوء مؤلف من جسيمات متماثلة وهذا هو الإثبات الوحيد الذي قدّمه نيوتن لدعم نظريته الجسيمية. وكانت تلك أول فرضية تقول: إن الإشعاع مؤلّف من كميّات منفصلة.

الضوء يتحدّى نسبيّة غاليله

فرضت نظرية نيوتن الجسيمية نفسها حتى أوائل القرن التاسع عشر عندما نجح كل من توماس يانغ (١٧٧٣ - ١٨٢٩) وأوغوستين فرينل (١٧٨٨ - ١٨٢٧) في إثبات وجود طبيعة موجية للضوء، خلافًا لأفكار نيوتن، وذلك بتفسيرهما لظاهرتي التداخل والانعراج.

منذ عام ١٨١٧ أثبت فرينل أن الاهتزازات الضوئية يجب أن تكون معامدة لاتجاه انتشارها، وكان من الضروري وجود جسم ناقل لهذه الاهتزازات وبخاصة في الخلاء، وهذا الجسم الناقل الذي أطلقوا عليه اسم **الأثير الضوئي** يجب أن يكون مرنًا ويجب أن يتخلل كل جسم يمكن أن ينتشر فيه الضوء بالإضافة إلى الخلاء. أجريت تجارب كثيرة دون جدوى للتحقق من وجود هذا الوسط الأثيري. ومع أن هذه التجارب أخفقت في إثبات صحة وجود الأثير، إلا أن اثنتين منها بصورة خاصة أثبتتا أن قانون جمع السرعات في نسبية غاليله لاينطبق على الضوء.

١ - الضوء داخل الماء الجاري

إذا كان الوسط الكاسر للضوء متحركًا فقد يخطر لنا أن الأثير يبقى ساكنًا داخله، أو ينسحب جزئيًا أو كليًا مع حركة الوسط. وعندئذ يجب أن تكون سرعة الضوء فيه هي مجموع سرعة الضوء في الأثير وسرعة الأثير المنسحب.

للتأكد من أن الأثير ينسحب مع حركة الوسط درس فيزو في عام ١٨٥١ تغير سرعة الضوء داخل تيار مائي سرعته سر. في الماء الساكن بالنسبة إلي المخبر ينتشر الضوء بسرعة ضَ أقل من سرعته في الخلاء ض ونعبّر عن ذلك بالعلاقة ضَ= ض/ ن حيث ن هي قرينة انكسار الماء. قياسات فيزو لتأثير حركة الماء بالسرعة سر أوصلته إلى العلاقة التالية المعبّرة عن سرعة الضوء داخل التيار المائي:

$$\text{ضً} = \frac{\text{ض}}{\text{ن}} + \left(1 - \frac{1}{\text{ن}^{2}}\right)\text{سر}$$

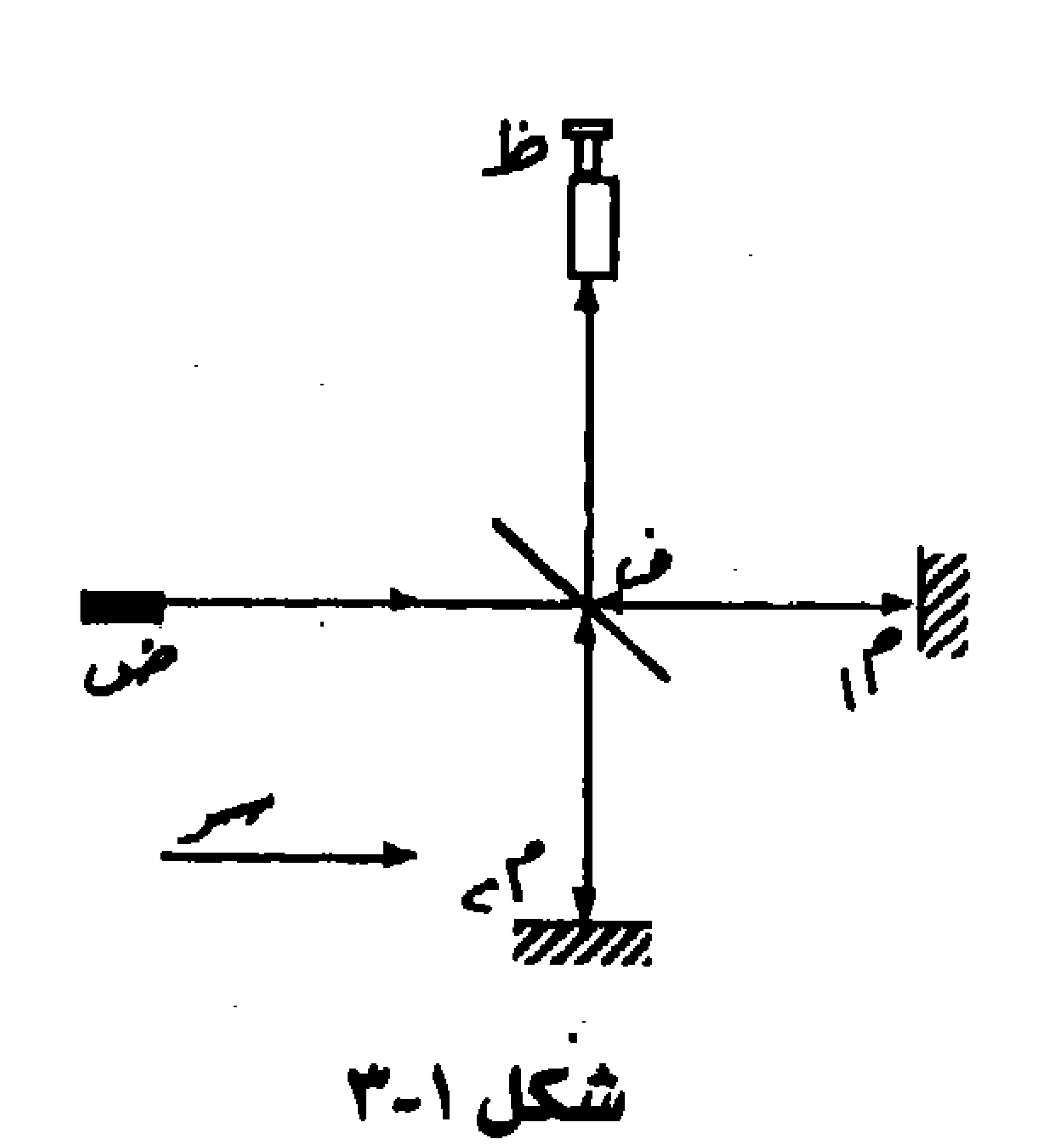
وهذه العلاقة لاتنطبق على قانون جمع السرعات وفقًا لنسبية غاليله. وإذا كان الأثير ينسحب بصورة كلّية فإن القياسات يجب أن تحقّق العلاقة ضً= ضَ+ سر ويمكن أن نفرض أن الأثير الذي يتخلل الماء المتحرك ينسحب معه بصورة جزئية.

والنتيجة التي لاجدال فيها هي أن سرعة تيار الماء تؤثّر على سرعة الضوء فيه. هذه العلاقة التي توّصل إليها فيزو بعد قياسات دقيقة جداً سيتم تفسيرها بعد خمسين سنة استناداً إلى نسبية أينشتاين.

٢- سرعة الضوء ثابت عام

في تجربة فيزو جرى قياس سرعة الضوء بالنسبة إلى مرجع هو المخبر لابالنسبة إلى الأثير. وإذا أردنا حقًا التحقق من وجود الأثير علينا التوصل إلى كشف حركة جسم بالنسبة إلى الأثير نفسه، ولذلك يجب أن يتحرك المنبع الضوئي والمشاهد مع حركة هذا الجسم.

بما أن المفروض هو أن الأثير مادّة تتخلل الكون بكامله، فإن الأرض بدورانها حول الشمس ستكون أشبه بمركب يتحرك داخل الأثير



شكل ١-٣

الساكن. لاشك في أن سرعة الأرض وهي ٣٠ كم/ ثا تقريباً صغيرة نسبياً بالمقارنة مع سرعة الضوء ولكن بعض التقنيات الضوئية التي كانت معروفة منذ ذلك العصر كانت دقيقة جداً ويمكن أن يخطر لنا أن سرعة الأرض ستضاف إلى سرعة الضوء إذا كان الأثير يقوم بدور مرجع ثابت.

ولكن تجربة مايكلسن ومورلي التي أجريت عام ١٨٨٧ قضت على أي أمل في ذلك. في هذه التجربة (شكل ١-٣) ينقسم الضوء الوارد من منبع ضوئي ض إلى شعاعين عندما يصادف صفيحة نصف شفافة ف. يصل هذان الشعاعان المتعامدان إلي مرآتين $م_١$، $م_٢$. ينعكس هذان الشعاعان ويعودان إلى الصفيحة ف، ثم يجتمعان ويتجهان إلى منظار المشاهدة ظ حيث يتداخلان. إذا كانت المسافتان ف $م_١$ وف $م_٢$ متساويتين، وأدرنا ذراع الجهاز لنضع المرآة $م_١$ باتجاه حركة الأرض فإننا نتوقع أن تكون سرعتا الشعاعين مختلفتين، استناداً إلى قانون غاليله في جمع السرعات، فالمفروض هو أن سرعة الشعاع الذي يسير بموازاة حركة الأرض ستكون مختلفة عن سرعة الشعاع الذي يسير متعامداً مع هذه الحركة. يتميّز تداخل الضوء بظهور مناطق مضيئة ومظلمة بالتناوب داخل المنظار تدعى مناطق التداخل، وإذا كان أحد الشعاعين أسرع من الآخر فإنه يحتاج إلى زمن أقل ليصل إلى المنظار وتتحرك مناطق التداخل مسافة معينة إلى إحدى الجهتين. إذا أدرنا الآن ذراع الجهاز ٩٠° لنضع المرآة $م_٢$ باتجاه حركة الأرض فإننا سنتوقع انتقال مناطق التداخل بالمسافة نفسها إلى الجهة الأخرى ولكن نتيجة التجربة كانت عدم الكشف عن أي انتقال لمناطق التداخل. أعيدت التجربة فيما بعد بمزيد من الدقة ومع ذلك لم يتم الكشف عن أي انتقال لمناطق التداخل.

وضعت فرضيات كثيرة لتفسير هذه النتيجة. فرض جورج فيتزجيرالد أن كل

جســـم يتقلّـــص باتجاه حركته. ووافق لورنتز على فرضـــية فيـــتزجيرالد لإنقـــاذ نظريتـــه المتعلـــقة بالأثيـــر. جرت فيما بعد تجارب للتحقق من فرضـــية فيـــتزجيرالد.

أخيراً أسهمت تجربة مايكلسن ومورلي في البرهان على ثبات سرعة الضوء التي سنرمز لها بالحرف ض، وهذه السرعة لن تضاف إلى سرعة المنبع الضوئي كما هو مفروض في نسبية غاليله.

٣- نسبية غاليله تتصدّع

في أواخر القرن التاسع عشر وقعت نسبية غاليله في مشكلة أخرى. جمع جيمس ماكسويل (١٨٣١- ١٨٧٩) القوانين الكهربائية المغناطيسية في أربع معادلات، واســـتنتج منها أن الضـــوء هو أيضًا موجة كهرطيسية (كهربائية مغناطيسية) وهكذا جمع الكهرباء والمغناطيسية والضـــوء في نظريـــة واحدة. لم يشـــك أي عالم من معاصـــري مكســـويل في صحـــة معادلاتـــه ولكن نســـبية غاليلـــه لم تكن صالحة للتطبيق على هذه المعادلات. فهذه المعادلات لم تحافظ على صياغتها عند تطبيق تحويل غاليله أي إنها ليست غير متغيّرة ضمن تحويل غاليلـــه.

هل يقتصر تطبيق نسبية غاليله على الميكانيك؟ لقد أدّت التجارب والنظريات إلى تصدع نسبية غاليله ولابد لها من إنقاذها وبدلاً من منقذ واحد كان هناك اثنان: هنري بوانكاريه وألبرت أينشتاين.



هنري بوانكاريه (١٨٥٤- ١٩١٢)
أسهم في تأسيس النسبية الخاصة

الفصل الثاني

لم يعد الزمن كما كان سابقًا

كانت النظرية النسبية التي تم تطويرها في مطلع القرن العشرين مراجعة جذرية لمفهومي المكان والزمان. وأهميتها في الفكر العلمي لاتقلّ عن أهمية نظام كوبرنيك في القرن السادس عشر. وإذا كانت النسبنية تبدو مخالفة للبداهة، وإذا كانت قد صادفت في بداياتها معارضة شديدة فقد حدث ذلك أيضًا للثورة الكوبرنيكية.

تنطبق بداهتنا على العالم الذي نحسّ به مباشرة. ولكنّ عالم النسبية ليس عالمنا، إنه عالم الجسيمات الصغيرة جدًا وعالم الأجرام اللامتناهية في كبرها، كالمجرّات والكون بأسره. إنه عالم لانستطيع إدراكه إلا من خلال الاستدلال المنطقي، ولامجال للبداهة في هذا العالم وسنرى ذلك في هذا الفصل فيما يخصّ مفهوم الزمن.

توسيع مبدأ النسبية

عندما كانت النظرة إلى الميكانيك التقليدي هي أنه العلم الأساسي الذي يسمح بدراسة ظواهر الطبيعة كلّها لم يكن هناك مجال للشك في مبدأ نسبية غاليله. ولكنّ تطوّر علمَيْ الكهرباء والضوء، واللذين جمعتهما نظرية

مكسويل الكهرطيسية أثبت أن الميكانيك لم يعد كافيًا بمفرده لدراسة الظواهر الفيزيائية كلّها.

١- الزمن والمكان المطلقان

يصعب وضع تعريف لمفهوم الزمن على رغم ارتباطه بحياتنا. ورأى باسكال أن مفهوم الزمن بديهي جداً ولاجدوى من وضع تعريف له.

من يستطيع تعريفه؟ لماذا نضع تعريفًا له طالما أن الناس جميعًا يدركون المقصود منه دون حاجة إلى المزيد من التعريف به.

لاشك في أن لكلّ منا إدراكه الداخلي للزمن ولكن هذا الإدراك بعيد عن التحديد وعندما يفكّر الفيلسوف في مفهوم الزمن يجد أن هذا المفهوم رجراج وهذا ما اعترف به القديس أغسطين عندما كتب:

أظن أني أعرف الزمن إذا لم يطلب أحد مني تحديده أما إذا طلبوا مني هذا التحديد فإني لاأعرفه.

ولكن الفيزيائي لايستطيع الاكتفاء بهذه الأفكار الذاتية، وهو بحاجة إلى جعل المقادير الفيزيائية كلّها قابلة للقياس، وهذا هو الغرض من استخدام الميقاتيات في قياس الزمن. يفرض مبدأ نسبية غاليله أن أية ميقاتية لن تتأثر إذا تحركت حركة انسحابية منتظمة، وذلك لأن آلية عمل الميقاتية سواء أكانت معتمدة على الرقّاص أم على اللولب مثلاً ستعمل وفق قوانين الميكانيك، وهذه القوانين هي نفسها في أيّ مرجع غاليلي. وإذا كان لدينا مرجعان ج، جَ يتحرك كلّ منهما بالنسبة إلى الآخر بحركة انسحابية منتظمة فإن ز= زَ دائمًا. كان نيوتن هو أول من صاغ هذا المفهوم عندما أدخل في علم الميكانيك **الزمن المطلق** والشامل.

الزمن المطلق، الحقيقي والرياضي، غير المرتبط بالخارج يجري بانتظام، ويدعى المدّة

ومع أن نظام كوبرنيك حوّل مفهوم المكان المطلق إلى نسبي، فإن نيوتن يفرض أنّ من الممكن تحديد موقع كل جسم في الفراغ بدقّة:

يبقى المكان المطلق مماثلاً لنفسه وساكنًا ومستقلاً عن محتوياته.

كان البحث عن الأثير الضوئي الساكن مبنيًا على الأمل في إيجاد مرجع مطلق، ولكن نسبية بوانكاريه وأينشتاين ستثبت أنه لايوجد زمن مطلق أو مكان مطلق.

٢- تبخّر الأثير، وكذلك الزمن والمكان المطلقان

في نهاية القرن التاسع عشر جرت مناقشات كثيرة حول تفسير تجربة **مايكلسن** ومورلي، وأدّى ذلك إلى إحداث تجديد في مفهومي الزمن والمكان. كتب هنري بوانكاريه، في كتابه **دروس في الفيزياء الرياضية** المنشور عام ١٩٠١ عن فرضية فيتز جيرالد المتعلقة بتقلّص الأجسام باتجاه حركتها:

تبدو هذه الصفة الغريبة كأنها إحدى لمسات الطبيعة الهادفة إلى منع دراسة الحركة المطلقة للأرض عن طريق الظواهر الضوئية وأنا أرى ذلك غير مقنع.

هذه التأمّلات جعلت بوانكاريه يتّجه نحو ميكانيك جديد، وفي كتابه **العلم والفرضية** المنشور عام ١٩٠٢ كتب:

المكان المطلق، والزمان المطلق، والهندسة نفسها ليست شروطًا مفروضة على الميكانيك.

كانت الأفكار التي ستؤدي إلى النسبية الجديدة قد بدأت بالظهور، وكان بوانكاريه من روّادها. ومبدأ النسبية يجب ألا يقتصر على الميكانيك بل يجب أن يشمل الظواهر الفيزيائية كلّها. في عدد كانون الأول عام ١٩٠٤ من مجلة العلوم الرياضية استعرض بوانكاريه المبادئ الكبرى في الفيزياء ومنها:

[...] مبدأ النسبية، وبموجبه يجب أن تبقى قوانين الظواهر الفيزيائية دون تغيير بالنسبة إلى مشاهد ساكن، أو مشاهد متحرك بحركة انسحابية منتظمة، وهكذا لن تكون لدينا أية وسيلة لنعرف إن كنا نتحرك حركة كهذه.

إن توسيع مبدأ النسبية ليشمل الظواهر الفيزيائية كلها لايمكن أن يتمّ إلا بتغيير تحويل غاليله، لأن قوانين الكهرطيسية لاتحافظ على صيغتها عند تطبيق هذا التحويل.

٣- مسلّمة أينشتاين

أضاف بوانكاريه فرضية أخرى إلى مبدأ النسبية للوصول إلى تحويل يمكن تطبيقه على القوانين الفيزيائية كلّها. ستسمح له هذه الفرضية بوضع تحويل أساسي سيكون أساساً للنسبية الخاصة وهو المعروف بتحويل لورنتز.

ولكن أينشتاين الشاب الذي بزغ نجمه في سماء الفيزياء النظرية بعد أن درس أعمال كل من سبقوه كان ذا رؤية أشمل لمبدأ النسبية وأضاف إليه مسلّمة أخرى.

ينتشر الضوء في الخلاء بسرعة ثابتة (ض) بالنسبة إلى جمل المقارنة المتحركة بحركة نسبية مستقيمة ومنتظمة كلّها.

إن **مبدأ ثبات سرعة الضوء**. وهذه المسلّمة المبنية على تجربة **مايكلسن** ومورلي تعمّم نتائج هذه التجربة على جمل المقارنة الغاليلية كلها، ومع أنها تكافئ **مسلّمة** بوانكاريه من الناحية الرياضية، إلا أن لمسلّمة أينشتاين صفة فيزيائية بسيطة وجوهرية، وهي ستسمح لنا بمعرفة سبب كون الزمن نسبياً ومرتبطاً بالمرجع.

إن مبدأ النسبية المعمّم على الظواهر الفيزيائية كلّها، ومسلّمة ثبات سرعة

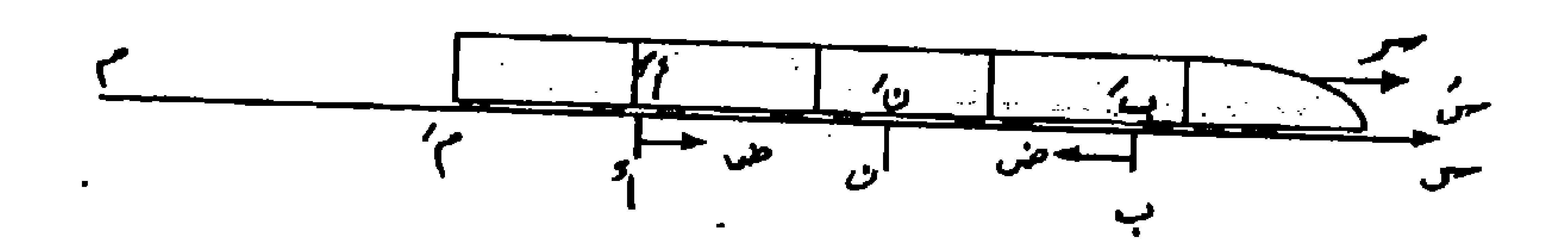
الضوء هما أساسا نظرية النسبية الخاصة، وكغيرهما من المسلّمات لاقيمة لهما إلا بالنتائج التي يمكن استخلاصها منهما والتي قد تؤكدّها التجربة، أو لا تؤكدّها.

الزمن صار نسبيًا

إن مسلّمة ثبات سرعة الضوء التي وضعها أينشتاين تستلزم التخلّي عن مفهوم الزمن المطلق.

١- قطار أينشتاين

استخدم أينشتاين مثال القطار في مناسبات مختلفة لإيضاح الأفكار الأساسية للنسبية الخاصة باستخدام **تجارب ذهنية**، والتطوّر التقني ساعد على إحلال قطار أينشتاين محل مركب غاليله.



شكل ٢-١

يتحرك قطار بسرعة ثابتة سر بالنسبة إلى سكة حديدية (شكل ٢-١) تمثل السكة مرجعًا هو ج والقطار يمثّل مرجعًا هو جَ.

يثبّت مصباحان على السكة في النقطتين أ، ب وتوجد النقطة ن في منتصف المسافة بين أ و ب تمامًا. يرسل كلّ من المصباحين ومضة ضوئية نحو (ن).

نقول إن الومضتين الصادرتين من أ و ب متواقتتان إذا التقتا في المنتصف ن وبما أن سرعة الضوء متساوية في مختلف اتجاهات الفراغ فإن قولنا إن الومضتين

متواقتتان يعني أنهما صدرتا في زمن واحد ز من النقطتين أ و ب. نقول إن هاتين الحادثتين متواقتتان بالنسبة إلى المرجع ج.

هل هما كذلك بالنسبة إلى القطار؟ نرمز بالأحرف أَ، بَ، نَ إلى النقاط الموجودة في القطار المتحرك والتي كانت تواجه النقاط أ، ب، ن في اللحظة ز التي صدرت فيها الومضتان على على الرصيف والنقطة نَ تقع إذن في منتصف المستقيم أَبَ داخل القطار المتحرك.

كانت النقطة نَ تطابق النقطة ن في اللحظة ز عند صدور الومضتين، وبما أنَّ نَ تتحرك نحو اليمين بالسرعة سر (شكل ٢-١) فإنها لن تبقى متطابقة مع النقطة ن. هذه النقطة نَ تقترب من الومضة الضوئية الصادرة عن ب وتبتعد عن الومضة القادمة من أ. وهكذا فإن المشاهد الموجود في النقطة نَ والذي يطل من نافذة القطار سيرى الومضة القادمة من ب في زمن أبكر من زمن رؤيته للومضة القادمة من أ. هذا المشاهد المفروض الذي يستخدم القطار مرجعًا له سيصل إلى نتيجة هي أن الومضة القادمة من ب صدرت قبل الومضة القادمة من أ أي إن انطلاق الومضتين ليس متواقتًا.

وهكذا نجد أن الحدثين المتواقتين بالنسبة إلى السكة الحديدية ليسا متواقتين بالنسبة إلي القطار والعكس صحيح. ولكل جملة مقارنة تتحرك بحركة انسحابية منتظمة زمنها الخاص.

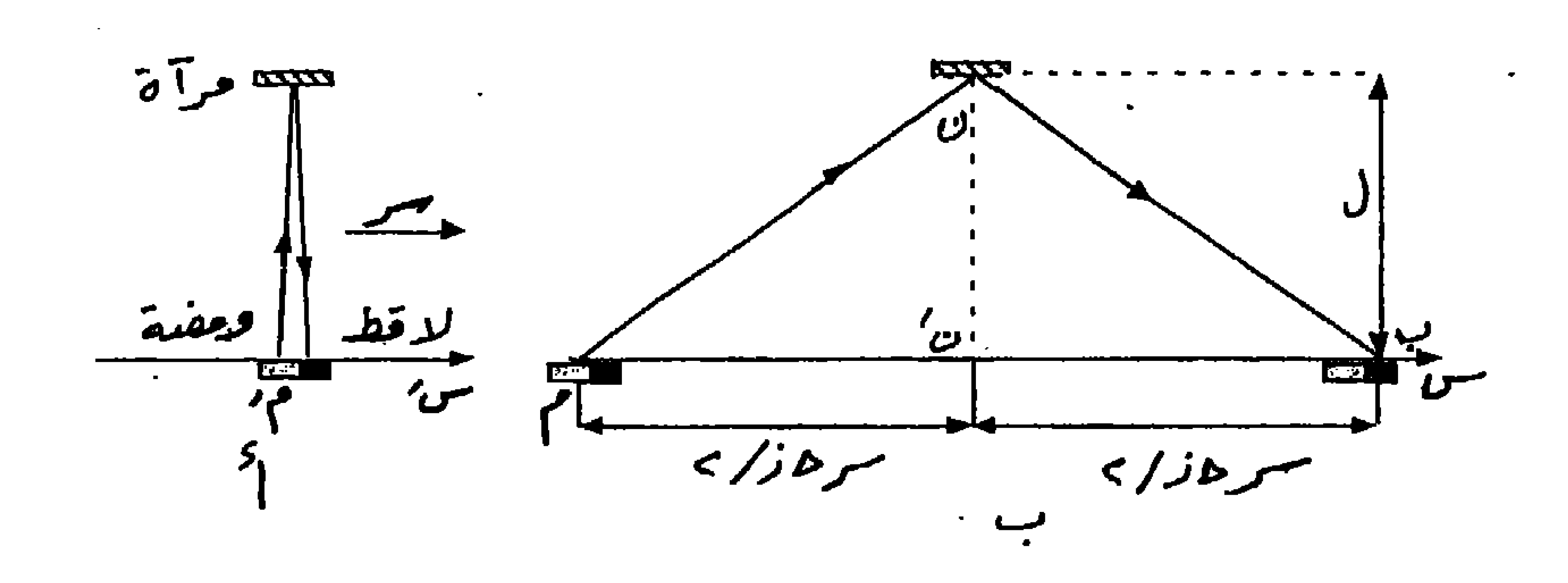
لا معنى للتعبير عن الزمن إلا بذكر جملة المقارنة التي نعبّر عنه ضمنها.

٢- ميقاتية فيثاغورس

سنصنع ميقاتية تسمح بحساب العلاقة بين الزمنين المقيسين في مرجعين غاليليين. تتألف هذه الميقاتية من مرسل لومضات قصيرة جداً تعكسها مرآة على بعد ل من المرسل (شكل ٢-٢-أ) وهذه الميقاتية محمولة على القطار. الزمن اللازم

لذهاب الومضة وعودتها هو: Δ زَ= ٢ل/ ض. يوجد لاقط يلتقط الومضة المنعكسة عن المرآة ويسبّب انطلاق ومضة جديدة. إن هذا الجهاز هو ميقاتية واحدة قياس زمنها هي Δ زَ .

يتحرك القطار ومعه الميقاتية بسرعة سر بالنسبة إلى الرصيف. عندما تنطبق م على مَ عند اللحظة ز=زَ=٠ تصدر الميقاتية ومضة.



شكل ٢-٢

خلال الزمن الذي احتاجه الضوء للذهاب إلى اللاقط تكون الميقاتية قد تحرّكت بالنسبة إلى المشاهد الواقف على الرصيف. إنه سيرى وصول الشعاع الضوئي إلى المرآة عند ن ثم إلى اللاقط عند ب بعد زمن Δ ز وتكون المسافة التي اجتازتها الميقاتية على امتداد الرصيف هي م ب = سر Δ ز (شكل ٢-٢-ب).

في المرجع ج يتبع الشعاع الضوئي المسار م ن ب. لنحسب طول هذا المسار، ولذلك نحتاج إلى تذكّر نظرية فيثاغورس، وهذا هو سبب إطلاق اسم هذا العالم الرياضي اليوناني القديم على هذه الميقاتية. في المرجع ج تمّ اجتياز هذا المسار م ن ب خلال زمن Δ ز بسرعة الضوء ض وهكذا تكون المسافة م ن ب= ض Δ ز .

بمقارنة العلاقتين (انظر الملحق الرياضي أ) نجد

$$\Delta\, ز = \gamma\, \Delta\, زَ$$

والكمية γ (غاما) تساوي $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - سر^2 / ض^2}}$

وهي كمية أكبر دائمًا من الواحد تدخل في الكثير من معادلات النسبية الخاصة وعندما نقيس مدّة زمنية Δ زَ بميقاتية القطار فإن المشاهد الموجود على الرصيف يقيس مدّة زمنية Δ ز أكبر من Δ زَ.

قياس الميقاتية المتحركة للزمن أبطأ من قياسها له وهي ساكنة. إنها ظاهرة **تباطؤ الميقاتية المتحركة**، والزمن المقيس باستخدام ميقاتية ساكنة بالنسبة إلى مرجع **يدعى الزمن الخاص للمرجع.**

تباطؤ الميقاتيات

للتحقق مباشرة من ظاهرة تباطؤ الميقاتيات نحتاج إلى أجهزة قياس دقيقة جداً وإلى انتقال الميقاتيات بسرعات كبيرة جداً، وقيمة γ هي في الحقيقة قريبة جداً من الواحد دائمًا حتى بالنسبة إلى السرعات التي تصل إليها الطائرات والصواريخ.

١-كيف تطيل عمرك

يزداد وضوح ظاهرة تباطؤ الزمن كلّما زادت سرعة الميقاتية بالنسبة إلى المشاهد ولذلك لايمكن تأكيد هذه الظاهرة إلا في مجال فيزياء الجزيئات، لأن هذه الجزيئات قد تصل إلى سرعات قريبة من سرعة الضوء.

والميقاتية المتحرّكة هي الجزيئة نفسها. وفي الحقيقة يكون عمر بعض الجزيئات قصيراً جداً عند قياسه في حالة السكون، أي في مرجع مرتبط بالجزيئة. وبالعكس إذا كانت الجزيئة متحركة بالنسبة إلى مرجع ثابت، فإنّ عمرها يطول جداً بالنسبة إلى هذا المرجع.

لندرس مثلاً حالة جزيئة تدعى الميزون μ وهو موجود في الأشعة الكونية وعمر μ^+ الوسطي عند قياسه في المخبر يعادل ٢,٢ × ١٠^-٦ ثانية وفي نهايتها يتفكك الميزون متحولاً إلى جزيئات أخرى. هذا العمر هو زمن خاص، لأن الجزيئة ساكنة بالنسبة إلى المخبر.

إن سرعة انتقال الميزون μ^+ في الجو قريبة من سرعة الضوء وتصل قيمة العامل γ إلى ١٠ ويكون المسار الحر الوسطي للميزون = العمر الوسطي × السرعة= ٦٦٠ م تقريبًا ولكنّ هذه الجزيئات قد اكتشفت عند سطح البحر بعد أن اجتازت بضعة كيلومترات في الجوّ. والنسبية هي التي جعلت تفسير ذلك ممكنًا. فعمر الميزونات المتحركة يزداد بالنسبة γ أي ١٠× ٢,٢ ×١٠^-٦= ٢,٢×١٠^-٥ ثانية، وخلال هذا الزمن يجتاز مسافة أكبر بعشر مرّات أي ٦,٦ كم تقريبًا وهذا يفسّر وصوله إلى مستوى سطح البحر.

من الناحية التاريخية، كان العمر الوسطي للميزونات المتحركة برهانًا تجريبيًا مباشراً على تباطؤ الميقاتيات، ولكن هذا التباطؤ يمكن التحقق منه يوميًا في المسرّعات الكبيرة المعاصرة. إن كثيراً من الجزيئات غير مستقرة، وبتغيير سرعتها يمكن التحقق من صحة العلاقة Δ ز= γ Δ زَ المعبّرة عن تباطؤ الميقاتيات. وفي مجال فيزياء الجزيئات المتسارعة تقوم النسبية بدور أساسي مستمرّ.

٢- فعل دوبلر النسبوي

عندما تصدر الذرّات ضوءاً من لون معيّن يمكن استخدام هذه الظاهرة لقياس الزمن.تصدر الذرات أمواجًا، والمسافة بين قمتّي موجتين متتاليتين هو طول الموجة، وهو ثابت ويعبّر عن واحدة قياس الزمن في الميقاتية.

عندما تتحرك الذرّات بسرعة بالنسبة إلى المخبر ستتباطأ هذه الميقاتية ويزداد طول موجة الضوء وبالتالي يتغيّر لونه. وهذا هو فعل دوبلر النسبوي.

والمقارنة مع طول الموجة الصادر عن ذرات ساكنة تؤكد أن القياسات تتفق تمامًا مع النظرية النسبية فيما يخص تباطؤ الميقاتيات المتحركة.

هل تخرج ميقاتية القطار عن طريقها؟

١- لايمكن الخروج عن المبادئ

وفقًا لمبدأ النسبية تكون المراجع الغاليلية كلّها متكافئة فيما بينها، لاتمييز لأحدها عن غيره. وإذا كانت ميقاتية قطار أينشتاين تبطئ بالنسبة إلى ميقاتيات السكة فيجب بالمقابل أن تبطئ هذه الميقاتيات بالنسبة إلى ميقاتية القطار.

وهذا واضح، ونستطيع إعادة البرهان بأن نفرض أن الرصيف هو الذي يتحرك بالنسبة إلى القطار بسرعة (-سر) وبما أن العامل γ لايتعلّق إلا بمربع السرعة فإننا نحصل على النتيجة نفسها مهما كانت جهة السرعة. ويبقى مبدأ النسبية مطبّقًا.

٢- هل جنّت الساعات؟

هذه الساعات التي تشاهد القطارات وهي تمر، هل جنّت كما حدث للأبقار؟ هل تأثرت آلاتها الفيزيائية بالسرعة؟

وفقًا لمبدأ النسبية يجب أن تبقى القوانين الفيزيائية كما هي في جمل المقارنة الغاليلية كلّها، والميقاتيات المتماثلة ستعمل بالشكل نفسه في القطارات المتحركة وعلى الرصيف. ولكن الذي يتغيّر هو المدّة الزمنية في أحد المراجع **بالنسبة إلى مرجع آخر** وتباطؤ الميقاتيات لامعنى له إلا عند قياسه في جملتي مقارنة ولكنّ هذا الفرق بين المدتين حقيقي.

لاتوجد أفضلية لأي مشاهد عند قياس الزمن. وما يقيسه كل مشاهد هو معدّل تغيّر إحدى الظواهر الفيزيائية في الكون.

٣- ما هو الزمن «الحقيقي»

لنعد إلى مثال الميزونات التي تتفكك. ما هو عمرها «الحقيقي»؟ إن وضع السؤال بهذا الشكل لامعنى له، ولايكتسب معنى إلا إذا حدّدنا المرجع الذي نقيس العمر ضمنه.

ويوجد مع ذلك مرجع مفضل، وهو المرتبط بالجزيئة وهو يقيس عمرها الخاص ولكن زمنها الخاص لايتعلق بسلوكها داخل هذا المرجع وعندما تكون الجزيئة متحركة فإنّ عمرها بالنسبة إلى الأرض «حقيقي» أيضاً كما هي حال عمرها الخاص.

وما نقول عنه عادة إنه زمن «حقيقي» ليس سوى الزمن الخاص ولكنّ عاداتنا ومفاهيمنا البديهية تجعلنا ننظر إلى زمن على أنه حقيقي أكثر من غيره.

٤- تناقض التوأمين

تبدو بعض نتائج النظرية النسبية كما لو كانت تناقض مبادئ النظرية نفسها وهو ما يسمّى تناقضات النسبية، وتناقض التوأمين هو من الأمثلة الشهيرة على ذلك. يمكننا مقارنة ضربات القلب بدقّات الساعة وهكذا نستطيع استخدامها في قياس الزمن. لنفرض أن لدينا توأمين «س» و«ع». وأن أحدهما وهو «س» سافر في سفينة فضائية سرعتها قريبة من سرعة الضوء. وتابع رحلته خلال ١٠ سنوات بسرعة ثابتة ثم عاد إلى الأرض بالسرعة ذاتها.

وبما أن الميقاتيات تتباطأ خلال الحركة مهما كان اتجاه السرعة فإن ميقاتية «س» البيولوجية ستتأخر عن ميقاتية «ع» وهكذا، عندما يعود «س» إلى الأرض سيكون أصغر سنّاً بكثير من «ع»

ولكن تطبيق مبدأ النسبية يفرض أن «ع» أيضاً سيكون أصغر سنّاً من «س» وهذا هو التناقض.

ولكن الحقيقة هي أن المسافر لم يكن دائماً في جملة مقارنة غاليليّة. فهو سيتباطأ ثم يتسارع ليعود في الاتجاه المعاكس وقد يتحرك على منحنى مغلق وفي الحالتين لاتكون جملة المقارنة غاليلية باستمرار. وهكذا لاتطبّق النسبية الخاصة على المسافر. ولكننا سنرى أن «س» يستطيع، ضمن إطار الجمل غير الغاليلية، أن يعود إلى الأرض أصغر سنّاً من توأمه.

الفصل الثالث

وحدة المكان والزمان

كان نيوتن يرى أن المكان والزمان المطلقين كيانان منفصلان تمامًا. ولكنّ تحويل غاليله يوضح أن الإحداثي سَ= س-سرز لجملة متحركة بحركة مستقيمة منتظمة مرتبط بالزمن. والنسبية الخاصة ستزيد من هذا الارتباط وستثبت عدم وجود زمن منفصل عن الفراغ الثلاثي الأبعاد لأنهما سيتحدان ضمن كيان واحد رباعي الأبعاد هو المكان- الزمان.

بوانكاريه، لورنتز، أينشتاين والآخرون

التحويل الذي يدعى تحويل لورنتز هو الذي حدّد العلاقة بين المكان والزمان في النسبية الخاصة. ومع أن اسمه هو تحويل لورنتز إلا أن بوانكاريه هو الذي وضع هذا التحويل الأساسي ونشره. وسنعرض كيفية حدوث ذلك.

١- تواضع هنري بوانكاريه

كان الفيزيائي الهولندي هندريك لورنتز (١٨٥٣- ١٩٢٨) من أبرز علماء الكهرطيسية النظريين. وقد أثبت أن معادلات مكسويل المطبقة على المواد المحسوسة يمكن استخراجها من خواص الإلكترونات الداخلة في تركيبها.

كما درس لورنتز احتفاظ معادلات مكسويل بشكلها عند الانتقال من مرجع إلى مرجع آخر متحرك. وضع أولاً قانونًا تقريبيًا للتحويل ولم يكن صالحًا إلا في

السرعات الصغيرة. وبعد ذلك، وفي عام ١٩٠٤ نشر في مجلة **أكاديمية أمستردام للعلوم** تحويلاً آخر رأى أنه قد يكون صحيحًا مهما كانت السرعة ولكن ثبت أنه غير صحيح.

ولكنّ هنري بوانكاريه نشر التحويل الصحيح في ٥ حزيران عام ١٩٠٥ في مذكّرة ضمن **تقارير أكاديمية العلوم** في باريس، وللاعتراف بفضل لورنتز، كتب بوانكاريه في هذه المذكّرة:

> **النتائج التي حصلت عليها تتفق في نقاطها الأساسية مع نتائج لورنتز ولم أفعل سوى تغيير بعض النقاط التفصيلية أو إكمالها. والنقطة الجوهرية التي وضعها لورنتز هي أن معادلات الحقل المغناطيسي لن تتغير عند تطبيق تحويل معيّن (سأسميّه تحويل لورنتز) وهو على الشكل التالي...**

وذكر بعد ذلك المعادلات الموضحة لهذا التحويل والتي سنعرضها لاحقًا. وبوانكاريه المتواضع إذن هو الذي اقترح إطلاق اسم لورنتز على التحويل الذي وضعه هو. لاشك في أن أبحاث لورنتز وجّهته في أعماله ولكن أصالة بوانكاريه في النتيجة لاجدال فيها.

لتفسير نتيجة تجربة مايكلسن ومورلي وافق لورنتز على التحويل الذي اقترحه فيتزجيرالد وهو سَ= γ س وهو خطأ وأدى إلى خطأ آخر في تحويل الزمن زَ أما المسألة المطروحة أمام بوانكاريه فقد كانت تعميم تحويل غاليله ليشمل الظواهر الفيزيائية كلّها. ومن الواضح أن المعادلة التي وضعها لورنتز لاتؤول إلى تحويل غاليله في حالة السرعات الصغيرة ووجد بوانكاريه أن المعادلة الصحيحة هي

سَ= γ (س-سرز) لأن γ تنتهي إلى الواحد عند السرعات الصغيرة. بقي دور بوانكاريه في وضع النظرية النسبية مجهولاً زمنًا طويلاً. ومنذ زمن قريب أعلن

ستيفن واينبرغ أحد واضعي نظرية توحيد القوى الكهرطيسية والضعيفة، والحائز على جائزة نوبل في الفيزياء عام ١٩٧٩ أن النسبية الخاصة يجب أن تنسب إلى بوانكاريه وأينشتاين معًا.

في مذكّرة شهيرة عنوانها **حول التحريك الكهربائي للأجسام المتحركة** توصّل أينشتاين أيضًا إلى التحويل الذي نشره بوانكاريه قبل ذلك بشهر واحد، وأضاف أينشتاين إلى النسبية مسلّمة ثبات سرعة الضوء وأثبت بدوره صحة تحويل بوانكاريه.

٢- تحويل لورنتز

إذا اقتصرنا على تحويل غاليله نجده متعارضًا مع مبدأ ثبات سرعة الضوء. ولابد من إيجاد تحويل جديد يوفّق بين هذين المبدأين.

والإطار المستخدم هو دائمًا جملتا مقارنة ج (م س ع ص) وجَ (مَ سَ عَ صَ) تتحرك كل منهما بالنسبة إلى الأخرى بحركة انسحابية منتظمة باتجاه المحور م س بسرعة سر (شكل ١-١). جملتا المقارنة مزوّدتان بمقاتيتين متماثلتين. وتم اختيار مبدأ قياس الزمن بحيث يكون ز=زَ. عند ما يكون مركزا جملتي المقارنة م، مَ منطبقين.

والمسألة المطروحة هي إيجاد العلاقات بين الإحداثيات س ع ص ز، سَ عَ صَ زَ والتي تسمح بتحقيق مبدأ النسبية ومبدأ ثبات سرعة الضوء معًا. ونظرًا لأهمية تحويل لورنتز في النظرية النسبية وضعنا في الملحق (ب) برهانًا كاملاً بسيطًا أعدّه المؤلف مع زميل له هو ميشيل كريزوس.

ونحصل على العلاقات التالية التي تدعى بمجموعها **تحويل لورنتز الخاص**.

سَ= γ (س–سر ز)، عَ=ع، صَ=ص، زَ= γ (ز– سر س/ ض^{٢}) ويمكن تعميم هذه المعادلات للوصول إلى **تحويل لورنتز** في الحالة العامة عندما لاينطبق

المحور مَ سَ على المحور م س، وعندما لاتكون الحركة الانسحابية باتجاه أحد المحاور، ولكننا سنقتصر على الحالة المذكورة وهي انطباق مَ سَ على م س وكون الحركة الانسحابية باتجاه هذا المحور.

لقد أسهمت أبحاث عدد من العلماء في أواخر القرن التاسع عشر بصورة مباشرة أو غير مباشرة في الوصول إلى النظرية النسبية الخاصة ومنهم و. فويت الذي توصّل عام ١٨٨٧ إلى إيجاد التحويل الذي أقرّه بوانكاريه لاحقًا ولكنه لم يلق الاهتمام الكافي وطواه النسيان. أما مسلّمة ثبات سرعة الضوء فقد كانت نتيجة أبحاث تجريبية طويلة.

٣- التحقق من المسلمتين

يسمح تحويل لورنتز بالتأكد من أن سرعة الضوء تبقى ثابتة في المرجعين ج، جَ. إذا صدرت ومضة ضوئية من النقطة م في اللحظة ز= . وانتشرت وفق المحور م س بالسرعة ض فإنها ستصل إلى مسافة س بعد زمن ز حيث س= ض ز

نبدل قيمة س هذه في المعادلتين المعبّرتين عن سَ وزَ في تحويل لورنتز ونجد سَ= ض زَ

لقد اجتازت الومضة المسافة سَ خلال زمن زَ في المرجع جَ وهكذا تكون سرعة انتشارها هي سَ / زَ= ض. إنّ تحويل لورنتز يؤكد مسلّمة ثبات سرعة الضوء، وهذا بديهي لأن هذه المسلّمة استخدمت في وضع صيغ هذا التحويل.
ينطبق مبدأ النسبية أيضًا على الكهرطيسية، وإذا طبقّنا تحويل لورنتز على معادلات مكسويل يمكن البرهنة على أن هذه المعادلات تحافظ على أشكالها. إنها **لامتغيرة** من خلال تحويل لورنتز.

وهو ينطبق أيضًا على معادلات الميكانيك التقليدي عندما تكون السرعات صغيرة جداً بالمقارنة مع سرعة الضوء.

وفي هذه الحالة يكون تحويل لورنتز منطبقًا من الناحية العملية على تحويل غاليله ويكون العامل γ مساويًا للواحد عمليًا ويكون المقدار $\frac{\text{سر}}{\text{ض}^{2}}$ قريبًا

جـداً مـن الصـفـر وهـكـذا نجـد أن تحـويـل لـورنـتـز يعطيـنـا :

$$س' = س - سر ز ، ز' = ز$$

وعندما تكون السرعة سر أكبر لابد من تعديل قوانين الميكانيك التقليدي لتبقى دون تغيير عند تطبيق تحويل لورنتز . وهذه القوانين الجديدة تعود إلى أشكالها القديمة عندما تكون سر صغيرة بالمقارنة مع ض .

٤- تحويل لورنتز العكسي

بما أن تحويل لورنتز هو أحد قوانين الطبيعة لابد من تحقيقه لمبدأ النسبية ويستلزم ذاك أن يكون التحويل العكسي الذي يعبّر عن ز ، س بدلالة زَ ، سَ مماثلاً في شكله للتحويل المباشر المذكور سابقًا . وبعملية حسابية بسيطة نجريها على معادلات تحويل لورنتز نجد :

$$س = \gamma (س' + سر ز') ، ع = ع' ، ص = ص' \quad ز = \gamma (ز' + \frac{سر\ س'}{ض^{2}})$$

وهي نفسها صيغة التحويل المباشر ولكن السرعة الآن هي سرعة ج بالنسبة إلى جَ وهي تساوي -سر .

٥- مبدأ حتمي تقريباً

أقرّ بوانكاريه وأينشتاين تحويل لورنتز ، وأضافا إلى مبدأ النسبية مسلّمة إضافية تقوم فيها سرعة الضوء بدور أساسي . ولكن ما دور الضوء في العلاقات الأساسية بين الزمن والمكان؟

أثبتت الدراسات الحديثة أن بالإمكان الوصول إلي تحويل لورنتز انطلاقًا من مبدأ النسبية بمفرده وبرهان «لوران نوتال» المنشور عام ١٩٩٢ في **المجلة الدولية للفيزياء الحديثة** لم يستخدم سوى الحدّ الأدنى من الفرضيات . والتحويل المطلوب هو علاقات خطية بين الإحداثيات المكانية والزمن في مرجعين ج ، جَ وهذا يعني اختيار أبسط تحويل ممكن .

استخدم مبدأ النسبية بوجود ثلاثة مراجع ج،جَ،جً. والتحويل عند الانتقال من ج إلى جً يجب أن يطابق جمع تحويلين متتاليين من ج إلى جَ ثم من جَ إلى جً وبتعبير آخر: جمع تحويلي لورنتز يجب أن يعطي تحويل لورنتز. ولاحظ المؤلف أيضًا أن توجيه المراجع الغاليلية اختياري بصفة مطلقة وينتج ذلك عن مبدأ النسبية وصيغة التحويل عند الانتقال من ج إلى جَ يجب ألا تتغيّر إذا وضعنا –س بدلاً من س و–سَ بدلاً من سَ.

وانطلاقًا من هذه الفرضيات الناتجة عن مبدأ النسبية توصّل «نوتال» إلي تحويل لورنتز، ولاشك في أن المعادلات التي توّصل إليها لاتتضمن سرعة الضوء ولكنها تحوي ثابتًا اختياريًا تمّ إدخاله خلال البرهان.

يمكن أن تكون قيمة هذا الثابت محدودة أو لانهائية. وإذا كانت قيمته لانهائية تصبح قيمة العامل γ مساوية للواحد ونصل إلى تحويل غاليله.

وإذا كانت للثابت قيمة محدودة لابد من إيجاد قوانين جديدة للميكانيك لاتتغير عند تطبيق التحويل عليها. هذه القوانين التي جرت دراستها لاحقًا تثبت أن الجسيمات الماديّة لايمكنها أبدًا بلوغ قيمة معينة نهائية للسرعة. أما الجزيئات التي ليست لها كتلة فلايمكن أن تتحرك إلا بهذه السرعة النهائية وتلك هي حالة فوتونات الضوء. ويتطابق الثابت الرياضي المستخدم في التحويل مع سرعة الضوء. إن سرعة الجزيئات ذات الكتلة المعدومة هي سرعة حدّية وقيمتها هي نفسها في المراجع الغاليلية كلّها.

يوضح هذا البرهان أن تحويل لورنتز هو نتيجة مباشرة لمبدأ النسبية بالنسبة لأي جسم كتلته لاتساوي الصفر، ويؤكّد ذلك صحة حدس أينشتاين بأن **مبدأ النسبية [...] طبيعي جداً وبسيط جداً وحتمي تقريباً.**

الزمن يتباطأ والأطوال تتقلّص

١- كل ميقاتية متحركة تتباطأ

يسمح تحويل لورنتز بحساب تباطؤ الميقاتيات المحسوب سابقًا. لنفرض وقوع حدثين في نقطة واحدة $\text{س}'_{.}$ من المرجع ج' في اللحظتين $\text{ز}'_{1}$ ، $\text{ز}'_{2}$

ويقابلها في المرجع ج باستخدام تحويل لورنتز العكسي:

$$\text{ز}_{1} = \gamma\,(\text{ز}'_{1} + \text{سر}\ \text{س}'_{.}\ /\ \text{ض}^{2})\ ،\ \text{ز}_{2} = \gamma\,(\text{ز}'_{2} + \text{سر}\ \text{س}'_{.}\ /\ \text{ض}^{2}).$$

المدّة الفاصلة بين هذين الحدثين في المرجع ج هي

$$\Delta\,\text{ز} = \text{ز}_{2} - \text{ز}_{1} = \gamma\,(\text{ز}'_{2} - \text{ز}'_{1}) = \gamma\ \Delta\ \text{ز}'$$

ونجد مرّة أخرى التعبير عن تباطؤ الميقاتيات والذي وجدناه في الفصل الثاني باستخدام ميقاتية فيثاغورس. والبرهان في هذه المرّة مستقل عن أية ميقاتية بعينها، وينتج فقط عن مسلّمات النسبية الخاصة.

٢- الأطوال تتقلّص

يسمح تحويل لورنتز بإيجاد العلاقة التي وضعها فيتز جيرالد عن تقلّص الأطوال ولكن بتفسير مختلف جداً.

لنصعد مرّة أخرى إلى قطار أينشتاين الذي يحمل مسطرة هذه المرّة. تنتقل المسطرة بالسرعة سر بالنسبة إلى الرصيف. قياس طول هذه المسطرة سهل داخل القطار لأنها ساكنة بالنسبة إليه. لنرمز بالحرفين $\text{س}'_{1}$ ، $\text{س}'_{2}$ لإحداثيي طرفي المسطرة ويكون طولها في المرجع ج' $\text{طول}' = \text{س}'_{2} - \text{س}'_{1}$ ونسميه **الطول الخاص**

كيف نقيس طول هذه المسطرة بالنسبة إلى الرصيف، أي في المرجع ج

لذلك يجب تعيين إحداثيّي طرفي المسطرة في جملة المقارنة ج في **لحظة واحدة** لأن المسطرة متحركة. نرمز بالرمز $\text{ز}_{.}$ للحظة تعيين هذين الإحداثيين. نجد من تحويل لورنتز أن

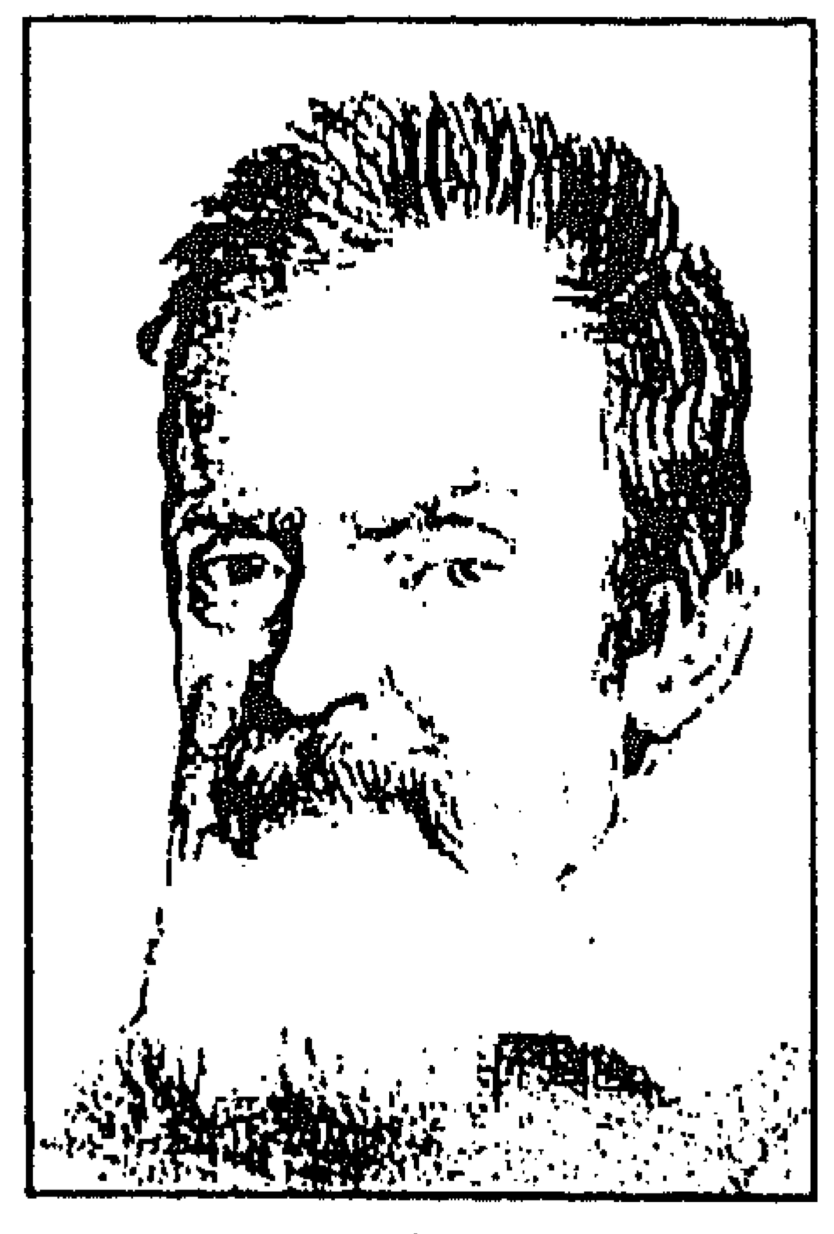
$\text{س}'_{١} = \gamma\,(\text{س}_{١} - \text{سز}_{٠})$ ، $\text{س}'_{٢} = \gamma\,(\text{س}_{٢} - \text{سز}_{٠})$

والفرق بين هذين الإحداثيين هو $\text{س}'_{٢} - \text{س}'_{١} = \gamma\,(\text{س}_{٢} - \text{س}_{١})$

الفرق $(\text{س}_{٢} - \text{س}_{١})$ هو طول المسطرة بالنسبة إلى الرصيف، نرمز بالحرف ل لهذا الطول في المرجع ج ونجد : $\text{ل}_{٠} = \gamma\,\text{ل}$

إنها ظاهرة تقلّص الطول . إن طول جسم ما يتعلق بجملة المقارنة، والطول الأعظمي هو في المرجع الذي يكون الجسم ساكنًا بالنسبة إليه لأن γ أكبر من الواحد . قد نتساءل إن كانت المسطرة المتحركة تصبح أقصر **فعلاً**، أي كما تصور فيتزجيرالد تخضع لانكماش مادّي باتجاه الحركة . ولكن لامجال للتفكير في ذلك لأن مبدأ النسبية يستلزم أن تكون الحالة الفيزيائية للمسطرة هي نفسها في المراجع الغاليلية كلّها . ومن جهة أخرى نذكّر بأن تقلّص المسطرة متبادل وهو ما ندركه باستخدام تحويل لورنتز العكسي . وهكذا لاتوجد أية ظاهرة انكماش فيزيائي للأجسام المتحركة .

وقد نتساءل أيضًا : ما هو الطول «الحقيقي» للمسطرة؟ وهذا الطرح للسؤال ناقص ولامعنى لمفهوم طول جسم إلا بالنسبة إلى مرجع معيّن . وطول المسطرة «الحقيقي» بالنسبة إلى القطار هو $\text{ل}_{٠}$ كما أن طولها «الحقيقي» بالنسبة إلى الرصيف هو ل ومن جهة أخرى لابدّ من التذكير بأننا إذا أجرينا قياسات لجسم متحرك في المرجع ج فإن امتداده بموازاة جهة الحركة سيكون أقل من قيمته ضمن مرجعه الخاص خَ .

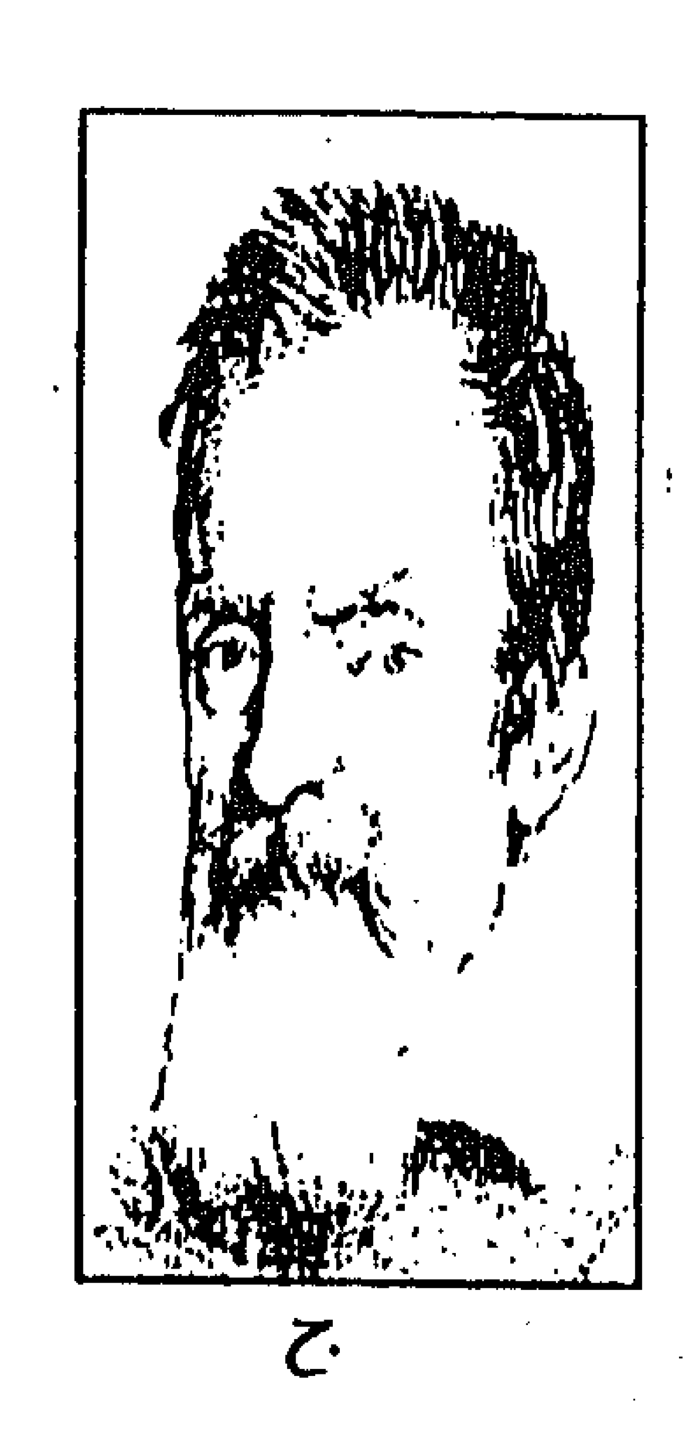


ج'   ج

قياس في المرجع ج

غاليله ساكن في ج وأينشتاين يتحرك نحو اليمين





ج'   ج

قياس في المرجع ج'

أينشتاين ساكن في ج و غاليله يتحرك نحو اليسار

أينشتاين و غاليله في حركة انسحابية نسبية منتظمة. تقلّص أبعاد الصور متبادل

٣- قطار سريع جداً لايمكن تجاوزه.

عرضنا في الفصل الأول قانون جمع السرعات الناتج عن تحويل غاليله.

إذا تحرك قطار بسرعة سر_1 بالنسبة إلى الرصيف وإذا انتقل راكب بسرعة سرَ بالنسبة إلى القطار فإن سرعة انتقال الراكب بالنسبة إلى الرصيف هي

$\text{سر} = \text{سر}_1 + \text{سرَ}$

لنستخدم الآن تحويل لورنتز بدلاً من تحويل غاليله لإيجاد القانون الجديد لجمع السرعات. نفرض أن الراكب انطلق من النقطة مَ في اللحظة $\text{زَ} = 0$

بعد زمن زَ يكون قد قطع داخل القطار المسافة $\text{سَ} = \text{سرَ}\,\text{زَ}$

باستخدام تحويل لورنتز نبدل في العلاقة السابقة سَ بقيمتها $\gamma\,(\text{س} - \text{سر}_1\,\text{ز})$ وزَ بقيمتها $\gamma\,(\text{ز} - \text{سر}_1\text{س}/\text{ض}^2)$ ونحصل على :

$$\text{س} = \left(\frac{\text{سرَ} + \text{سر}_1}{1 + \text{سرَ}\ \text{سر}_1/\text{ض}^2} \right) \text{ز}$$

المسافة التي اجتازها الراكب في القطار خلال الزمن ز هي س وسرعة انتقاله بالنسبة إلى الرصيف هي $\text{سر} = \text{س}/\text{ز}$ أي:

$$\text{سر} = \frac{\text{سرَ} + \text{سر}_1}{1 + \text{سرَ}\ \text{سر}_1/\text{ض}^2}$$

إذا كانت السرعتان سرَ، سر_1 صغيرتين بالمقارنة مع سرعة الضوء نعود من جديد إلى قانون غاليله لجمع السرعات. ومن جهة أخرى يؤكد هذا القانون صحة مبدأ النسبية. وإذا حسبنا سرَ بدلالة سر نجد العلاقة نفسها بوضع $-\text{سر}_1$ بدلاً من سر_1.

لايمكن لأي مجموع سرعتين أن يتجاوز سرعة الضوء ض وإذا كانت سر_1

أو $سر'$ تساوي ض فإن السرعة الحاصلة سر تساوي ض دائمًا . ولوكانت كل من $سر_1$ و$سر'$ تساوي ض فإن السرعة الحاصلة سر هي أيضًا تساوي ض ويبدو أن سرعة الضوء هي حدّ أقصى لايمكن لأي جسم متحرك أن يتجاوزها .

على ضوء النسبية ، كل شيء يتضّح

كثير من التجارب السابقة لنظرية النسبية يمكن تفسيرها بفضل تحويل لورنتز

١- الضوء داخل تيار مائي

تدرس تجربة فيزو الموصوفة في الفصل الأول تغير سرعة الضوء في تيار ماء سرعته سر . من اللافت للنظر أن هذه التجربة التي أجريت عام ١٨٥١ قد فُسّرت بعد أكثر من خمسين سنة استنادًا إلى النظرية النسبية .

في هذه التجربة يكون المنبع الضوئي ساكنًا بالنسبة إلي المخبر وهو جملة المقارنة ج . ويمثل التيار المائي جملة المقارنة ج' . سرعة الضوء في الماء الساكن هي $\frac{ض}{ن}$ حيث ن هي قرينة انكسار الماء . وجد فيزو أن سرعة الضوء في التيار المائي تعبّر عنها العلاقة التالية $ض' = \frac{ض}{ن} + (١ - \frac{١}{ن^٢})$ سر

وباستخدام قانون جمع السرعات المستند إلى تحويل لورنتز نجد

$$ض' = (\frac{ض}{ن} + سر) / (١ + \frac{ض\,سر}{ن} / ض^٢) \cong (\frac{ض}{ن} + سر)(١ - \frac{سر}{ن\,ض})$$

وبإهمال $\frac{سر^٢}{ن\,ض}$ لأنه صغير جدًا نجد $ض' = \frac{ض}{ن} + سر\,(١ - \frac{١}{ن^٢})$

إن النظرية النسبية أعطتنا معادلة فيزو الناتجة عن التجربة وهذا تحقّق مباشر من صحة النسبية الخاصة .

٢- مقياس تداخل مايكلسن

ألبرت مايكلسن (١٨٥٢ - ١٩٣١) هو مخترع مقياس التداخل الحسّاس جدًا والذي سمح له بإجراء تجاربه الشهيرة . أجرى مايكلسن أولى تجاربه بمفرده عام

١٨٨١ وأعادها مع إدوارد مورلي عام ١٨٨٧ . حصل مايكلسن على جائزة نوبل في الفيزياء عام ١٩٠٧ . والنتيجة السلبية لهذه التجربة هي التي قادت أينشتاين إلى وضع مسلّمة ثبات سرعة الضوء .

تسمح الصيغة النسبويّة لجمع السرعات بالوصول إلى النتيجة التجريبية، وهي أن سرعة الأرض لاتضاف إلى سرعة الضوء . ومهما كانت سرعة الأرض فإن حاصل جمع سرعتها مع سرعة الضوء ض هي دوما ض .

عالم مينكوفسكي الرباعي الأبعاد

يظهر تحويل لورنتز الارتباط الوثيق بين الزمان والمكان . لنحسب بمساعدة العلاقة $زَ = \gamma (ز - \frac{سر س}{ض^2})$ الفاصل الزمني في مرجع جَ بين حدثين حدثا في لحظة واحدة ز. في مرجع ج، في موقعين مختلفين $س_1$، $س_2$ بحساب الفرق $زَ_1 - زَ_2$ نجد :

$$\Delta زَ = \frac{\gamma سر}{ض^2} (س_1 - س_2)$$

والمسافة المكانية ($(س_1 - س_2)$) بين حدثين **متواقتين في ج** سببت وجود فاصل زمني $\Delta زَ$ بين هذين الحدثين في جَ. **والحدثان المتواقتان بالنسبة إلى مشاهد في ج ليس كذلك بالنسبة إلى مشاهد آخر في جَ.**

١- المكان والزمان يتّحدان

هذا التراكب بين الإحداثيات المكانية والزمن يجعلنا ننظر إلى الحوادث الفيزيائية كلها على أنها يجب أن تدرس ضمن مرجع ذي أربعة إحداثيات، ثلاثة منها مكانية : س،ع،ص والرابع هو الزمن ز. يكوّن هذا المرجع فراغًا رباعي الأبعاد يدعى الزمان- المكان.

إن كل حدث فيزيائي محدّد بالإحداثيات (س،ع،ص،ز) يمكن أن يوجد بجواره عدد من الأحداث «المجاورة» لاتختلف إحداثياتها إلا قليلاً جداً

عن (س ، ع ، ص ، ز) ونقول : إن الزمـــان- المكـــان مـؤلـــف من مـتّـصِـــل ذي أربعــة أبعاد .

إن هرمان مينكوفسكي (١٨٦٤ - ١٩٠٩) هو الذي وضع الصياغة الرباعية الأبعاد للنسبية الخاصة . وكان أحد أوائل الذين عمّقوا المظاهر الرياضية لنظرية النسبية . ولابد من إبداء إعجابنا ببعد نظره العلمي، فمنذ عام ١٩٠٨ أكّد خلال إحدى محاضراته أن :

ما سأعرضه عليكم من دمج للزمان والمكان قد نبت في تربة الفيزياء التجريبية وهذا هو ما منحه القوّة. والمكان بمفرده والزمان بمفرده محكوم عليهما منذ الآن بالاختفاء واتحادهما وحده هو الذي سيكون له معنى بصفته حقيقة مستقلة .

٢- الزمن يصبح تخيّليًا

ولكن وكما لاحظ أينشتاين :

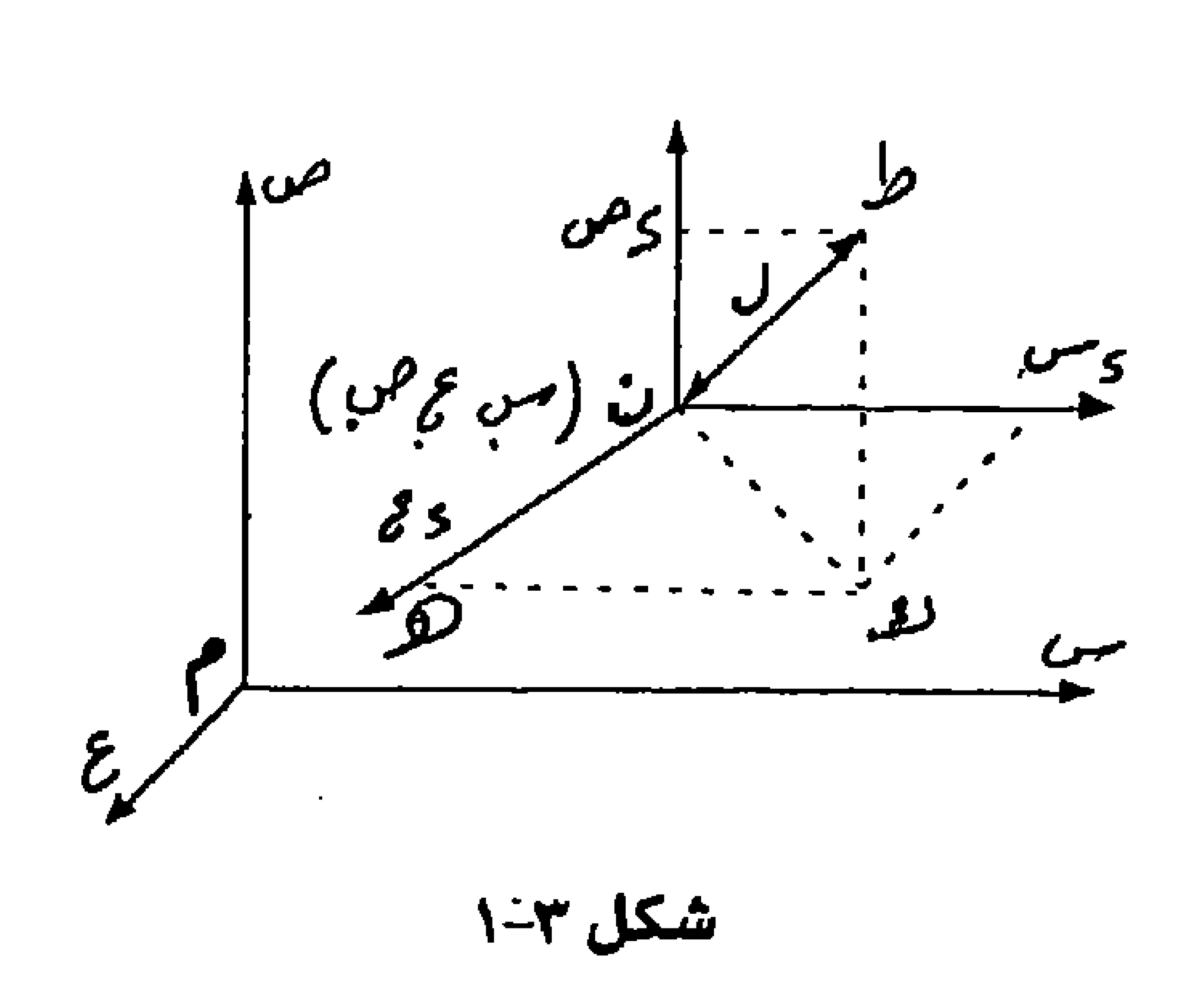
[...] أهم ما اكتشفه مينكوفسكي لتطوير صياغة نظرية النسبية هو معرفة أن متّصل الزمان- المكان ذا الأبعاد الأربعة الذي تمثّله النظرية النسبية يشبه في خواصه الأساسية متّصل فراغ الهندسة الإقليدية ذا الأبعاد الثلاثة .

لنر كيف يمكننا إيجاد التقارب بين الهندسة الإقليدية وهندسة الزمان- المكان . في الهندسة العادية تكون المسافة بين نقطتين مقداراً لامتغيّراً عند تغيير المرجع . لنحسب التعبير الدّال على المسافة بين نقطتين قريبتين إحداهما من الأخرى .

لتكن س. ، ع. ، ص. إحداثيات نقطة ن (شكل ٣-١) وس. + ء س ، ع. + ء ع ، ص. + ء ص إحداثيات النقطة ط . المسافة ل بين هاتين النقطتين تحسب

باستخدام نظرية فيثاغورس في المثلث ن هـك نجد $\overline{\text{نك}}^{2}$ = ءس^{2} + ءع^{2} وفي المثلث ن ك ط نجد ل^{2} = $\overline{\text{نك}}^{2}$ + ءص^{2} ومنه :

ل^{2} = ءس^{2} + ءع^{2} + ءص^{2}



شكل ٣-١

لندرس الآن في الزمان- المكان حدثين في نقطتين مختلفتين متقاربتين :

(س، ع، ص ز) و(س+ءس، ع+ءع، ص+ءص، ز+ءز)

نطلق اسم الفاصل بين الحدثين على المقدار الذي نرمز له بالرمز ءف والمعرّف بالمساواة

ءف^{2} = ءس^{2} + ءع^{2} + ءص^{2} − ض^{2} ءز^{2}

لنكتب مساواة مماثلة في مرجع آخر جَ متحرك بحركة انسحابية منتظمة بالنسبة إلى ج بالشكل التالي ءفَ^{2} = ءسَ^{2} + ءعَ^{2} + ءصَ^{3} − ض^{2} ءزَ^{2}

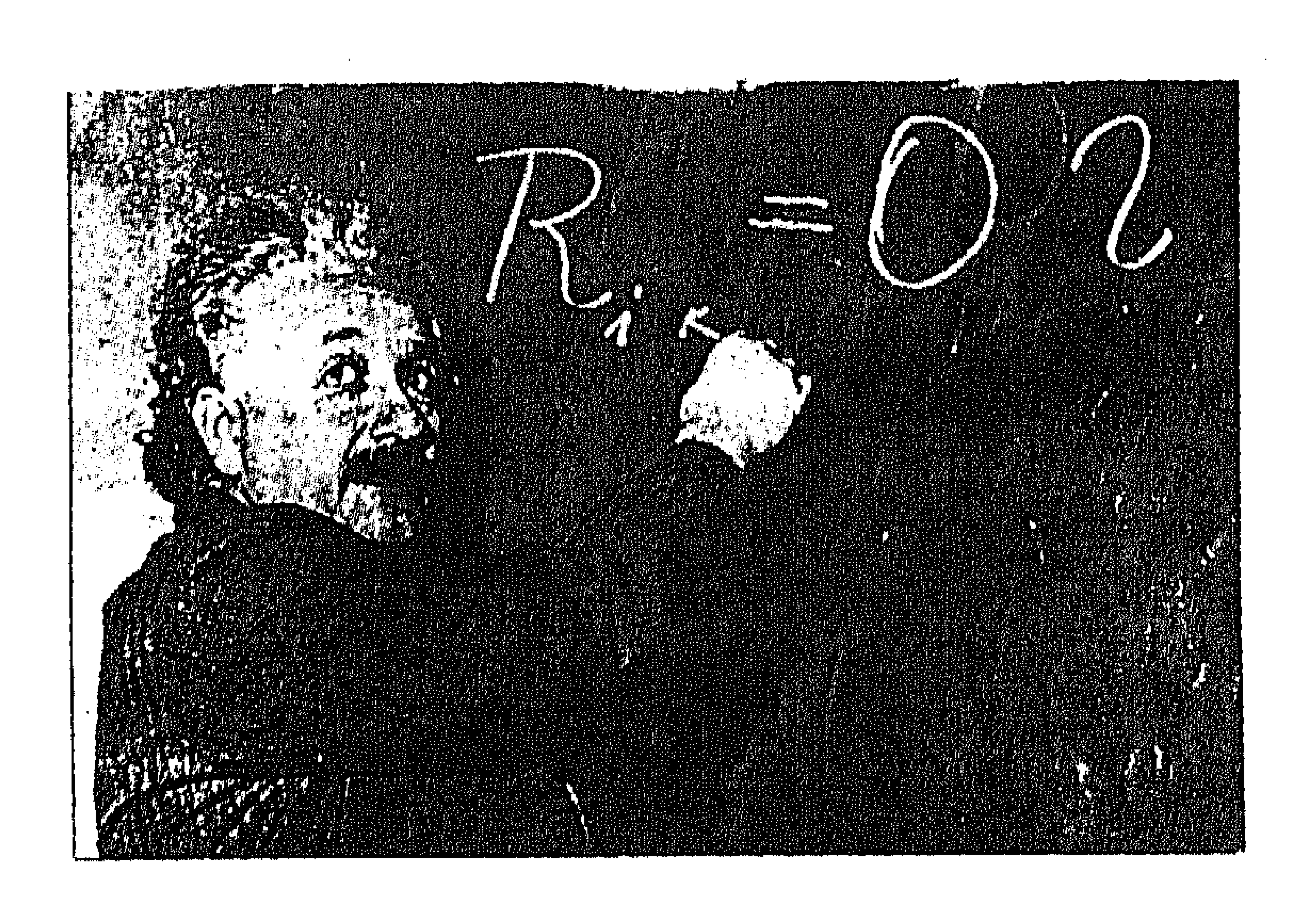
لنحسب العبارة الدّالة على ءف^{2} بدلالة الإحداثيات في جَ باستخدام تحويل لورنتز يظهر الحساب أن ءف^{2} = ءفَ^{3} . أي إن الفاصل هو مقدار لامتغير ضمن تحويل لورنتز الزماني المكاني .

لنضع الان هـ = ت ض ز = $\sqrt{-1}$ ض ز والمدّة الزمنية الصغيرة ءز تقابلها قيمة ءهـ = ت ض ءز ونعبّر عندئذ عن مربع الفاصل كما يلي :

ءف^{2} = ءس^{2} + ءع^{2} + ءص^{2} + ءهـ^{2}

يدخل إحداثي الزمن التخيّلي في الفاصل مع الإحداثيات المكانية . والتشابه تام بين المعادلة الدالة على الفاصل في الزمان- المكان والمعادلة الدالة على المسافة في

الفراغ الإقليدي. ويمكن أيضًا النظر إلى الزمان- المكان عند مينكوفسكي من الناحية الشكلية كما لو كان فراغًا إقليديًا ذا أربعة أبعاد. والتمثيل الهندسي في فراغ كهذا قد يساعد كثيرًا على تفسير عدد من الظواهر الفيزيائية، وتحويل لورنتز مثلاً هو دوران لجملة إحداثيات ضمن زمان- مكان مينكوفسكي.



ألبرت أينشتاين

الفصل الرابع

ماذا حدث للكتلة والطاقة؟

في بداية ظهور النظرية النسبية الخاصة ركّز عدد كبير من منتقديها على النواحي التجريبية. وفي الحقيقة لم يكن هناك سوى عدد قليل من التجارب اللافتة للأنظار والتي تؤكّد صحة النظرية. وأشهر معادلات النسبية الخاصة هي التي تعبر عن التكافؤ بين الطاقة والكتلة المضروبة بمربع سرعة الضوء.

$$ط = ك ض^{2}$$

وهذه المعادلة لم يجر التحقق منها مباشرة. وهذا التكافؤ المعبّر عنه منذ عام ١٩٠٥ كان مازال مشكوكاً فيه عام ١٩١٦ فقد كتب اينشتاين نفسه في ذلك العام:

> **لم يجر حتى الآن تحقق تجريبي مباشر لهذا المبدأ، لأن تغيرات الطاقة ط التي نستطيع إعطاءها لجملة ليست كبيرة إلى حدّ يكون معه تغير الكتلة السكونية للجملة ملحوظاً. والمقدار ط/ض^{2} صغير جداً بالمقارنة مع الكتلة ك التي كانت لدى الجسم قبل تغيّر طاقته. وهذا هو سبب نجاح مبدأ حفظ الكتلة التي لها قيمة خاصة.**

ولكن عندما ألقت قلعة طائرة أمريكية أول قنبلة ذرية على هيروشيما يوم ٦ آب ١٩٤٥ أدرك العالم كله أن المادّة يمكنها أن تتفكك لتتحول إلى طاقة هائلة. ولم تعد النسبية نظرية فقط، فقد دخلت فجأة وبقوّة إلى العالم الحقيقي.

ومنذ بداية النسبية الخاصة كانت هناك نتائج أقل لفتاً للأنظار ولكنها أكّدت صحّتها، ومنها بصورة خاصة ظاهرة تغيّر كتلة الإلكترونات مع السرعة.

علم التحريك النسبوي

العلاقة الأساسية في علم التحريك التقليدي والتي وضعها نيوتن عام ١٦٨٧ تقول: إن تسارع جسم يتناسب مع القوّة المطبّقة عليه، وثابت التناسب هو ما يسمّى كتلة هذا الجسم، وهو ثابت متعلق بالجسم ومستقل عن سرعته.

هذه العلاقة لامتغيرة عند تطبيق تحويل غاليله عليها، ولكنها لاتبقى كذلك عند تطبيق تحويل لورنتز، ولابد من وضع صياغة جديدة للقانون. الأساسي في علم التحريك. وبما أن الميكانيك التقليدي قد أثبت صحته فلابد من اتفاق الصياغة الجديدة مع الصياغة القديمة إذا كانت سرعة الجسم صغيرة جداً بالمقارنة مع سرعة الضوء.

١- الكتلة النسبوية والكتلة الخاصة

بعد أن تأكد أينشتاين من أن الميكانيك التقليدي بحاجة إلى بعض التغييرات، اقترح الإبقاء على مبدأ حفظ الاندفاع الموجود سابقاً ضمن الميكانيك النيوتني.

في حالة كتلة ك تتحرك بسرعة سر يكون الاندفاع هو كمية الحركة المعبّر عنها بالعلاقة كه = ك سر. وليكون الاندفاع لا متغيّراً عند تطبيق تحويل لورنتز. أثبت أينشتاين أن كه يجب أن يعبّر عنها بالشكل كه = ك (سر) سر حيث ك (سر) مقدار لايتعلّق إلا بالسرعة.

وهكذا لاتبقى الكتلة ثابتة بل يعبّر عنها بالشكل

ك (سر) = γ (سر) ك.

حيث ك. هي كتلة الجسم المقيسة في مرجع يكون الجسم ساكناً بالنسبة إليه.

وγ(سر) = ١ / $\sqrt{١ - سر^٢ / ض^٢}$ هو الأمثال المستخدم في الفصلين السابقين والمقدار ك. يدعى الكتلة الخاصة للجسم.

إذا كانت السرعات صغيرة إلى درجة كافية فإن الأمثال γ (سر) يكون قريباً من الواحد لأن سر^٢/ ض^٢ تكون صغيرة جداً وقريبة من الصفر وعندئذ لا تكون الكتلة الخاصة مختلفة جداً عن الكتلة في أثناء الحركة والمسمّاة **الكتلة النسبوية**.

كان تعبير الكتلة النسبوية مثار جدل بين فريقين من الفيزيائيين ، وفريق منهم كان يرى أن تعبير «الكتلة» يجب أن يدلّ فقط على مقدار فيزيائي خاص مستقل عن الحالة الحركية ، أما الفريق الثاني فقد رأى أن ك (سر) لها أبعاد كتلة ولا سبب يمنع من اعتبارها كتلة متغيرة. وإذا كان القارئ غير معنيّ بهذا النزاع فإننا سنحتفظ بتعبيري كتلة خاصة وكتلة نسبوية.

٢- عطالة الجسم تتعلّق بمحتواه من الطاقة

منذ شهر أيلول ١٩٠٥ نشر أينشتاين في **حوليات الفيزياء** مذكّرة عنوانها «هل تتعلّق عطالة الجسم بمحتواه من الطاقة؟» وانطلاقاً من اعتبارات تتعلّق بالطاقة الإشعاعية الصادرة عن جسم، عمّم أينشتاين النتيجة وذكر أن:

كتلة جسم هي قياس لمحتواه من الطاقة. إذا تغيرت هذه الطاقة بمقدار ط فإن كتلة تتغيّر بالاتجاه نفسه بمقدار يكافئ ط/ض^٢.

هذا التكافؤ بين الكتلة والطاقة صار أشهر معادلات أينشتاين، وكان هو نفسه يراه أهم نتائج النسبية الخاصة، وبوانكاريه أيضاً أدرك ومنذ عام ١٩٠٠ أن طاقة الإشعاع ط يمكن إعطاؤها عطالة ط/ ض^٢. ولكن أينشتاين عمّم الفكرة عندما وضع التكافؤ بين الكتلة الخاصة لجسم ومحتواه من الطاقة التي يمكن أن يطلقها عندما يتفكك.

في المعادلة ط= ك ض^٢ يدل الرمز ك في الحقيقة على الكتلة النسبوية، والرمز ط يدل إذن على طاقة الجسم المتحرك وباستخدام العلاقة الدالّة على ك (سر) نجد :

$$ط = \gamma\ (سر)\ ك_{\cdot}\ ض^{2}$$

والأمثال γ (سر) يتعلق بالسرعة وعندما سر= ٠ نجد γ (سر) = ١ وفي السرعات الصغيرة لاتختلف قيم γ (سر) إلا قليلاً عن الواحد ويمكن التعبير عنها بصورة تقريبية بالعلاقة γ = ١ + سر^{2} / ٢ض^{2} وباستخدام هذا التقريب يكون التعبير عن الطاقة :

$$ط = ك_{\cdot}\ ض^{2} + \frac{1}{2}\ ك_{\cdot}\ سر^{2}$$

طاقة الجسم المتحرك في الميكانيك التقليدي هي $\frac{1}{2}$ ك. سر^{2} والحدّ الأول ك. ض^{2} لا علاقة له بالسرعة وتدخل فيه قيمة الكتلة الخاصة للجسم. وهو تعبير خاص بالنسبية لأنه غير موجود في الميكانيك النيوتني. وهكذا نجد أن طاقة الجسم الساكن متناسبة مع كتلته الخاصة :

$$ط_{\cdot} = ك_{\cdot}\ ض^{2}$$

واختفاء كتلة جسم أو جزء منها يسمح بالحصول على طاقة حرارية أو ضوئية أو غيرهما.

وبما أن عامل التناسب بين الطاقة والكتلة وهو ض^{2} كبير جداً فإن الطاقة المكافئة للكتلة ضخمة جداً. وإذا حوّلنا مثلاً كتلة ١٠٠ كغ بكاملها إلى طاقة فإنها تكفي تقريباً لتغطية استهلاك فرنسا السنوي من الطاقة.

وبالعكس، إذا أعطينا لجسم مقداراً من الطاقة الحرارية مثلاً سيكون تغيّر كتلته صغيراً جداً. وتسخين كيلوغرام من الماء بمقدار ١٠٠°س لن يغيّر كتلته إلا ٥ × ١٠$^{-9}$ غرام. وهذه الكتلة لا تستطيع أدق الموازين قياسها.

٣- الطاقة المخزونة

يوضح هذا المثال أن مفهوم الكتلة صار مختلفاً عن مفهوم كمية المادّة. للتكافؤ بين الكتلة والطاقة نتيجة أسايية . ففي الفيزياء السابقة للنسبية يوجد مبدآن

أساسيان للانحفاظ : انحفاظ الطاقة وانحفاظ الكتلة، وكان كل مبدأ يبدو مستقلاً تماماً عن الآخر، والنظرية النسبية جمعتهما معاً . وإذا كانت جملة ما لا تمتص طاقة ولا تصدرها فإن كتلتها تبقى ثابتة . وبذلك يكون مبدأ انحفاظ الكتلة جزءاً من مبدأ انحفاظ الطاقة .

٤- انحفاظ متجه الاندفاع- الطاقة الرباعي الإحداثيات

لنعد إلى فضاء مينكوفسكي الرباعي الأبعاد . يمكن أن نتصور في هذا الفضاء متجهات لكل منها أربع مركّبات، ثلاث منها مكانية والرابعة زمنية .

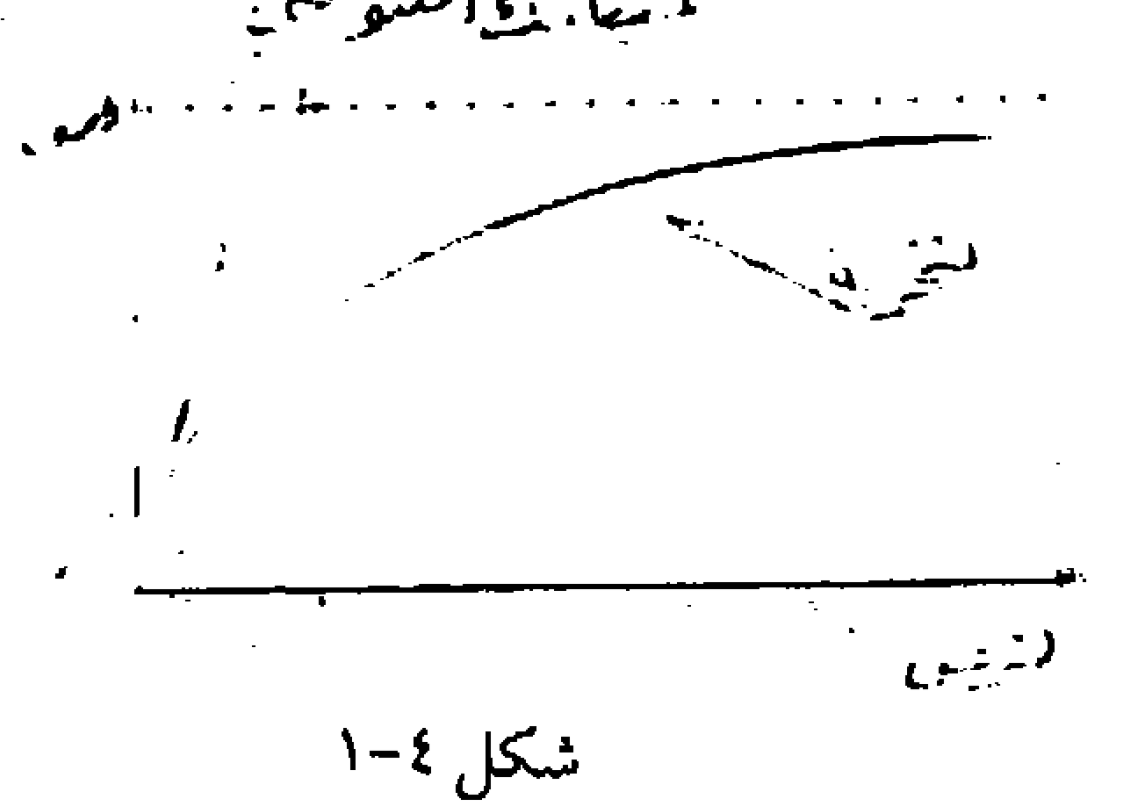
نضيف إلى مركّبات الاندفاع المكانية الثلاثة لجسيم مركّبة رابعة محمولة على محور الزمن تساوي طاقة الجسيم مقسومة على سرعة الضوء . هذه المركّبات الأربع هي ما نسميها مركّبات متجه الاندفاع- الطاقة الرباعي الأبعاد .

رأينا أن أينشتاين احتفظ بمبدأ انحفاظ الاندفاع بصفته أحد المبادئ الأساسية في علم التحريك النسبوي . ولكن الاندفاع بمفرده، وكذلك الطاقة بمفردها لايبقيان محفوظين إلا ضمن جملة مقارنة واحدة ويتغيران بين جملة مقارنة وأخرى . أما متجه الاندفاع- الطاقة الرباعي الأبعاد فيمكن البرهنة على أنه يبقى محفوظاً عند الانتقال من مرجع إلى آخر . وهكذا تؤول مبادئ الانحفاظ الثلاثة في الميكانيك النيوتني إلى مبدأ وحيد : انحفاظ متّجه الاندفاع- الطاقة الرباعي الأبعاد .

ونجد أن نظرية النسبية بقدرتها التبسيطية لم تعقد قوانين الطبيعة بل أدّت إلى توحيدها .

التحقق التجريبي

١- الكتلة تزداد مع السرعة



شكل ٤-١

يمكن التحقق مباشرة من تغيّر الكتلة النسبوية بدلالة السرعة عند

تسريع الجسيمات المشحونة داخل حقل كهربائي حيث يمكن الوصول إلى سرعات من رتبة سرعة الضوء وتكون التأثيرات النسبوية واضحة جداً.

عند تأثير حقل كهربائي منتظم على الجسيم المتحرك بحركة مستقيمة تكون القوّة المؤثرة ثابتة. ووفقاً للميكانيك النيوتني يجب أن يكون التسارع ثابتاً أيضاً وأن تزداد السرعة بصورة متناسبة مع الزمن. وإذا مثّلنا تغير السرعة مع الزمن تمثيلاً بيانياً يجب أن نحصل على مستقيم، كما هو ممثّل في الشكل ٤-١

ولكن التجربة تبين في حالة الحقول الكهربائية الشديدة أن السرعة لاتتبع القانون النيوتني. نشاهد أن تزايد السرعة يتجه نحو خط مقارب بحيث تبقى سرعة الجسيم أقل من سرعة الضوء، كما هو مبين في الشكل ٤-١

يسمح استخدام علم التحريك النسبوي بالوصول إلى القيم التجريبية بدقة كبيرة.

إن زيادة الكتلة النسبوية ك (سر) = γ (سر) ك. تقاوم التسارع مع تزايد سرعة الجسيم، وسرعة الضوء هي فعلاً سرعة حدّية للجسيمات المادّية كلها.

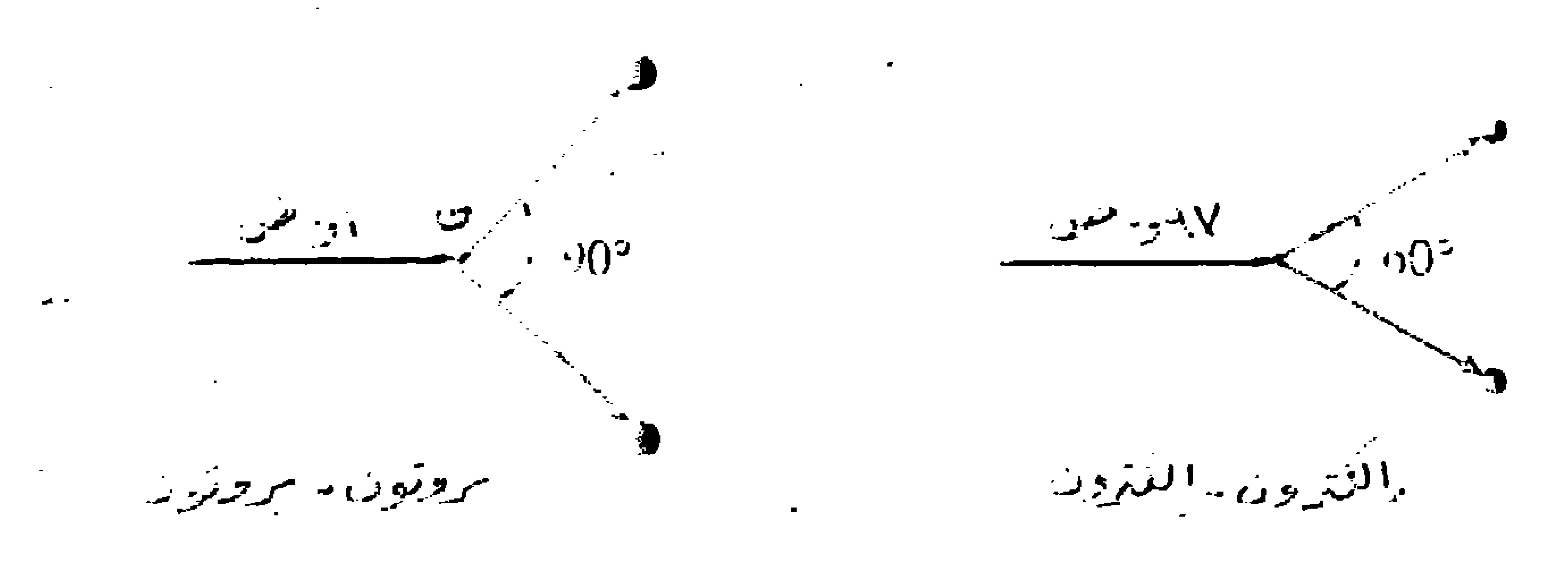
هذه الظاهرة هي الآن مألوفة في المسرّعات الحديثة الكبيرة. وسواء أكانت المسرّعات خطية أم دائرية فلا بد من استخدام علم التحريك النسبوي في تصميم وتنفيذ «قاذفات» الجسيمات. والنسبية هي جزء من العالم اليومي للفيزيائيين العاملين في هذه الآلات العملاقة ومنها حلقة التخزين التابعة للمركز الأوروبي للأبحاث النووية، وهي مخبر أوروبي لأبحاث الجسيمات بجوار جنيف ويبلغ قطرها ٣٠ كيلومتراً تقريباً.

٢- التصادم بين الجسيمات

يمكن أيضاً أن نتأكّد من تغيّر الكتلة النسبوية عند التصادم بين جسمين يتحرّك أحدهما بسرعة كبيرة جداً.

لندرس حالة جسيمين متماثلين ومتساويين في الكتلة السكونية، ليكن لدينا بروتونان مثلاً، أحدهما ساكن بالنسبة إلى المخبر والآخر متحرك بسرعة سر. بعد الصدمة في النقطة ن، كما يوضح الشكل ٤-٢، يتحرك كل من الجسيمين بسرعة ما وتوجد بين مساريهما زاوية (يه) تتعلق بالسرعة الابتدائية سر.

بتطبيق مبدأ ي انحفاظ الاندفاع والطاقة، يمكن البرهنة في الميكانيك النسبوي على أن الزاوية (يه) لاتتعلق إلا بمجموع الكتلتين النسبويتين للجسيمين.



شكل ٤-٢

في حالة السرعات الصغيرة ، أي ضمن مجال تطبيق الميكانيك النيوتني تكون الزاوية يه = ٩٠° دائماً، لأن تغيّر الكتلتين يكون معدوماً تقريباً . وإلى أن تصل السرعة إلى ا,٠ ض تبقى الزاوية (يه) مساوية إلى ٩٠° تقريباً وهذا ما يمثله تصادم بروتون- بروتون في الشكل ٤-٢

وعند زيادة السرعة تنقص الزاوية (يه)، وهكذا عند اصطدام الكترون سرعته ٩٧ , ٠ ض بإلكترون ساكن تكون الزاوية يه= ٦٠° تقريباً . وقياس الزوايا (يه) عند الاصطدامات بسرعات مختلفة يتفق تماماً مع النظرية النسبية.

٣- ارتباطات خطرة

تكوّن نوى الذرات يكون مصحوباً بفقدان الطاقة لأن العناصر الناتجة تكون

أكثـــر اســتـقـراراً من المكوّنـــات. هذا الفـرق في الطاقـــة والذي يدعى **طاقة الارتباط** يكون على حـــساب كـتل النكليـــونات أي البـروتونات والنتــرونات المكوّنة للنواة.

كتلة مجموع النكليونات في الحالة الحرّة أكبر من كتلتها وهي مرتبطة داخل النواة. لتكن كـ كتلة نواة تحوي ذ بروتونًا كتلة كل منها في الحالة الحرّة ك ب و ص نترونًا كتلة كل منها في الحالة الحرّة ك ن إن الفرق في الكتلة

Δ كـ = (ذ ك ب + ص ك ن) - كـ يعطينا طاقة الارتباط

وفقًا لمعادلة أينشتاين.

ط= Δ كـ ض^{2} = [(ذ كب + ص كن) - كـ] ض^{2}

وكلما ازداد نقص الكتلة عند تكوّن النواة تكون النواة الناتجة أكثر استقراراً.

طاقة الارتباط الوسطية لكل نكليون هي 8×10^{6} إلكترون فولط تقريبًا وهي أكبر بكثير من طاقة ارتباط الإلكترون بالنواة داخل الذرّة. وطاقة ارتباط الإلكترون في ذرة الهدرجين مثلاً هي ١٣,٦ إلكترون فولط. وهكذا ندرك أن التفاعلات النووية المتعلّقة بطاقة الارتباط بين النكليونات تنشر طاقة أكبر بكثير من الطاقة الناتجة عن التفاعلات الكيميائية المتعلّقة بطاقة ارتباط الإلكترونات.

توجد نوى ذرّات غير مستقرّة ولكنّها يمكن أن تتحوّل إلى نوى أكثر استقراراً.

ونواة ذرة الأورانيوم ٢٣٥ التي تحوي ٢٣٥ نكليونًا هي مثال على ذلك، وهذا الأورانيوم ما زال موجوداً على سطح الأرض لأنه تفككه بطيء جداً، ومن جهة أخرى، يمكن أن تنشطر نواة هذا الأورانيوم مع انطلاق طاقة كبيرة تستخدم في المفاعلات النووية لتوليد الحرارة ثم التيار الكهربائي.

ولكن مصادر الأورانيوم على سطح الأرض محدودة، ولذلك اتجه التفكير إلى تفاعل آخر يدعى الاندماج النووي، وهو صنع نوى من النكليونات مع إصدار

للطاقة ومع أن الأبحاث متواصلة منذ نصف قرن إلا أن تفاعل الاندماج ما زال خارجًا عن السيطرة.

لابدّ في الحقيقة من بلوغ درجات حرارة تبلغ بضعة ملايين من الدرجات لبدء تفاعل الاندماج النووي، وهذا مايحدث عندما تستخدم الحرارة الناتجة عن قنبلة ذرية مصنوعة من الأورانيوم أو البلوتونيوم للوصول ضمن منطقة محدودة إلى هذه الدرجة المرتفعة اللازمة لتفاعل الاندماج. يحدث هذا الاندماج بين نظيري الهيدرجين. الدوتيريوم والتريتيوم مع انتشار طاقة كبيرة جداً. وهذا هو مبدأ القنبلة الهيدروجينية ويمكن القول: إن قنبلة الأورانيوم تقوم بدور عود ثقاب لإشعال تفاعلات الإندماج، ولكنّ المعروف جيّداً هو أن اللعب بأعواد الثقاب قد يكون خطراً جداً.

طاقة الاندماج هي منشأ الإشعاع الصادر عن النجوم. «تشعل» الشمس هيدروجينها ضمن سلسلة من التفاعلات تحدث بتأثير وسيط هو الكربون وفقاً لدورة تخيّلها هـ. بيته عام ١٩٣٩ ويمكن تلخيصها بالمعادلة التالية:

٤ هيدروجين (١) ⟵ هيليوم (٤) + ٢ بوزيترون + ٢ نترينو + طاقة.

تتحول أربع نوى من الهيدروجين (١) إلى نواة من الهليوم (٤) مع انتشار طاقة تقدّر بـ ٢٥ مليون إلكترون فولط على شكل إشعاع كهرطيسي. تنشأ البوزيترونات والنترينوات في مركز الشمس حيث تكون درجة الحرارة ١٥ مليون درجة تقريباً. وقياس كتلة نواة الهليوم يؤكّد أنها فعلاً أقل من كتل أربع نوى هيدروجين.

وهكذا نجد أيضاً أن المعادلة ط=ك ض٢ هي التي سمحت بمعرفة منشأ الطاقة الهائلة الناتجة عن النجوم وبصورة خاصة عن النجم الذي يدفئنا يومياً بأشعته.

الفصل الخامس

النسبية أنجبت المادّة المضادة

إن دراســة الإشــعاع الضوئــي الصادر خلال احتــراق غــاز أو تهيج هذا الغـاز بقـوس كـهـربائـيـة أوضـحـت عدداً من الظواهر التي لم تتّضح إلا بفـضل النسبية الخاصة .

عند استـخدام المطياف لتبديد الضوء الصـادر عن ذرات الهيدروجين نحصل على مجموعة من الخطوط المضيئة تدعى **طيف** الإشعاع . وعند استـخدام جـهاز شــديد التبديد نجد أن كل خط يتألف بدوره من حزمــة من الخطوط الدقيقــة جداً هي **البنية الدقيــقة** للطيف وهي متراصّة جداً لايمكن تمييزها عن بعضها بعضاً في مطياف بسيط .

سنرى أن نظرية النسبية الخاصة هي التي سمحت بحساب أطوال موجات البنية الدقيقة داخل كل خط من الطيف . كما أن النظرية النسبية أوضحت عدداً من الظواهر الذرية التي استخدمها بول ديراك لوضع معادلة أصبحت شهيرة .

بور وسومر فلد وبنية الذرة

١- بور وذرة الهيدروجين

فــي عــام ١٩١٣ شــبّه نيلزبــور (١٨٨٣- ١٩٦٢) الـذرة بمجـمـوعـة شمسية مصغرة .

تصوّر أن نواة الذرة محاطة بإلكترونات تدور حولها على مسارات دائرية .

ولكن هذه الإلكترونات لها نزوات تختلف فيها عن الكواكب ، فهي قادرة على «القفز» من مسار إلى آخر . وعندما ينتقل الإلكترون من مسار كبير إلى مسار أصغر يخسر مقداراً من الطاقة تصدره الذرة على هيئة فوتون ضوئي .

استخدم بور الميكانيك التقليدي لحساب مستويات الطاقة المختلفة لكل من المسارات ، وعندما يقفز الإكترون من المسار (ن) إلى المسار (ن-١) تتغير طاقته من ط ن إلى ط ن-١ . والفرق بين هاتين الطاقتين ط ن - ط ن-١ يساوي طاقة الفوتون وهكذا نستطيع حساب طول موجته .

سمحت نظرية بور بحساب أطوال موجات خطوط طيف ذرة الهيدروجين وكانت نتائج الحساب مطابقة للقياسات التجريبية ، ولكنها اقتصرت على القياسات الناتجة عن مطياف قليل التبديد . وبقيت البنية الدقيقة للخطوط دون تفسير في نموذج بور الذي يبدو أنه عجز عن متابعة تفسير المزيد من الظواهر .

٢- القطوع الناقصة النسبوية لدى سومرفلد

أدخل الفيزيائي أرنولد سومرفلد (١٨٦٨- ١٩٥١) تحسيناً على نموذج بور ووضع معادلة تبين وجود سلسلة جديدة من مستويات الطاقة لإلكترون ذرة الهيدروجين وهي تسمح بحساب البنية الدقيقة لطيف الهيدروجين .

ولذلك أدخل سومر فلد مجموعة من المدارات الناقصية ، وطبق علم التحريك النسبوي على حركة الإلكترون على هذه المدارات الجديدة . تبين الصياغة الجديدة التي توصل إليها سومر فلد أن كل مستوى طاقة ط ن في نموذج بور ينقسم إلى مستويات بنية دقيقة عددها ن . وبما أن سرعة الإلكترون في الذرة أصغر بـ ١٣٧ مرّة تقريباً من سرعة الضوء فإن التأثيرات النسبوية ضعيفة مما يفسّر عدم تأثيرها سوى في انقسام الخطوط الطيفية الرئيسية .

ولكن نظرية بور- سومرفلد، على رغم هذا النجاح، لم تتوصّل إلى تفسير المزيد من الظواهر الفيزيائية، وعجزت عن تفسير طيف الذرات التي تحوي أكثر من إلكترون. لم يستطع نموذجهما تجاوز حدوده، وحوالي عام ١٩٢٣ رأى الفيزيائيون أنه لابدّ من إيجاد نظرية أكثر تطوّراً.

ثورة قام بها أمير

بالإضافة إلى ماسبق تبين أن مفهوم الإلكترون المداري الذي وضعه بور وسومر فلد لم يكن مرضياً لأنه تجاهل تماماً الطبيعة الثنائية: الجسيمية والموجية للضوء.

١- اينشتاين يحمل مشعل نيوتن

في أحد أبحاثه التي نشرها عام ١٩٠٥ وهو عام نشر بحثه عن النسبية يسلّم أينشتاين بأن الضوء مؤلف من كميّات منفصلة من الطاقة خلافاً للنظرية الموجية التي كانت سائدة عندئذ.

وفقاً للفرضية التي نعرضها هنا فيما يتعلّق بالشعاع الضوئي الصادر عن منبع نقطي فإن الطاقة لاتتوزع بشكل متواصل على فضاءات تزداد اتساعاً بل هي مؤلف من عدد محدود من كمّات الطاقة الموجودة في أماكن محددة من الفضاء. وكل منها ينتقل دون أن ينقسم ولايمكن امتصاص هذا الكمّ أو إصداره إلا دفعة واحدة.

وبذلك يكون أينشتاين قد عاد إلى النظرية التي أيّدها نيوتن حول البنية الجسيمية للضوء. كانت هذه الفرضية متعارضة مع كون الضوء موجة تنتشر في الفضاء بصورة متواصلة. ولكنها مع ذلك سمحت لأينشتاين بتفسير الفعل الكهرضوئي الذي نال بموجبه جائزة نوبل عام ١٩٢١، وهو لم يمنح الجائزة بموجب النظرية النسبية، مما يدلّ على أن هذه النظرية لم تكن عندئذ قد حازت على إجماع العالم العلمي.

٢- الثورة الكمومية:

لقيت النظرية الموجيّة للضوء نجاحًا كبيراً ولكن بدأ يتّضح تدريجيًّا أن الضوء والإشعاع الكهرطيسي عموماً مؤلّف أيضاً من كمّات منفصلة من الطاقة .

ومنذ عام ١٩٠٩ ، وخلال مؤتمر علمي في سالزبورغ أكّد أينشتاين أن الوصف الكامل للظواهر الإشعاعية يقتضي الجمع بين المفهومين الجسيمي والموجي . وكان لابد من الانتظار حتى عام ١٩٢٤ عندما حقق هذا الجمع أمير حقيقي هو لوي دوبروي ، انطلاقًا من النظرية النسبية ، وفي أطروحته التي دافع عنها أمام السوربون اقترح دوبروي الفرضية الأساسية التالية :

يمكن أن نتصور أنه بنتيجة قانون طبيعي أساسي ترتبط كل قطعة من الطاقة لها كتلة خاصة ك. بظاهرة موجية دورية ترددها (ن.) بحيث يكون لدينا هـ ن. = ك. ض^2 على أن يقاس ن. ضمن جملة مرتبطة بقطعة الطاقة.

هذه الفرضية ، كغيرها من الفرضيات، تتحدّد قيمتها بحسب النتائج التي يمكن استخراجها منها .

إنها المسلّمة الأولى لنظرية جديدة سمّيت أولاً الميكانيك الموجي ثم أصبح اسمها الميكانيك الكمومي . وستكون أساسًا للفيزياء المجهرية في القرن العشرين بكاملها . وسرعان ما تطوّرت النظرية الذرّية على أسس جديدة سمحت بالتخلّي التام عن نموذج بور .

٣- معادلة ستلاقي رواجاً كبيراً

استوحى الفيزيائي إروين شرودينغر (١٨٨٧ - ١٩٦١) أفكار لوي دوبروي ، ونجح في عام ١٩٢٦ في تصورّ معادلة كان يظن أنها تعبّر عن حركة موجية حقيقية ترافق الإلكترون في دورانه داخل ذرة الهيدروجين .

ومن الناحية الشكلية كانت معادلة شرودنغر تطبيقاً لمعادلة في الميكانيك النيوتني فحواها هو أن الطاقة الكليّة ط للإلكترون تساوي مجموع طاقته الحركية ك سر^{٢}/ ٢ = كه^{٢} / ٢ ك حيث كه = ك سر مع طاقته الكامنة طك أو

$$\text{ط} = \frac{\text{كه}^{٢}}{\text{٢ ك}} + \text{طك}$$

ونحصل على معادلة تدعى معادلة الموجة وهي تسمح بحساب مستويات طاقة الإلكترون في ذرة الهيدروجين ، والقيم الناتجة تطابق القيم الناتجة في نموذج بور مما يؤكّد صحة المعادلة. ولكن التابع الذي تعبّر عنه الموجة لايمثل مقداراً فيزيائياً تقليدياً كما كان يظن شرود نغر، بل يعبر عن احتمال وجود الإلكترون في نقطة ما خلال حركته حول النواة.

هذا التفسير الإحصائي يحدّ من النتائج الفيزيائية التي يمكن استخلاصها من معادلة شرود نغر. ومع ذلك لقيت هذه المعادلة رواجاً لأنها أوضحت الطريقة التي يمكن بها وضع معادلات الموجة لأيّة جملة فيزيائية، وذلك بكتابة التعبير التقليدي عن طاقتها ثم نقله إلى فضاء رياضي مجرّد.

لقد وجد لوي دوبروي وإروين شرودنغر مفاتيح الميكانيك الكمومي الذي سيحدث انقلاباً في فيزياء القرن العشرين كلّها.

الخواص المغناطيسية للجسيمات

تعيش الجسيمات الكمومية في عالم الفيزياء المجهرية. أما نحن فنعيش في عالمنا المحسوس. ولانستطيع إدراك خواص المادّة إلا بحواسنا وسنرى أن إحدى الخواص الكمومية وهي اللف الذاتي لايوجد ما يقابلها في عالمنا، ولانستطيع تمثيلها بصورة محسوسة.

١- الإلكترون المغناطيسي

في عام ١٨٩٦ اكتشف بيتر زيمان (١٨٦٥- ١٩٤٣) ظاهرة طيفية. كان

يدرس تأثير حقل مغناطيسي منتظم على الخطوط الطيفية لذرّة. لاحظ زيمان أن الذرة تصدر خطوطاً طيفية جديدة بتأثير الحقل المغناطيسي.

لم تستطع معادلة شرودنغر أن تفسر سوى جزء من النتائج التجريبية. وفي عام ١٩٢٥ خطرت لكل من جورج أولنبك (١٩٠٠-١٩٨٨) وساموئيل غودسميث (١٩٠٢-١٩٧٨) فكرة تشبيه الإلكترون بمغنطيس صغير، وتخيّل هذان العالمان أن هذا التمغنط ناتج عن دوران الإلكترون حول نفسه. وبما أن الدوران حول محور يمكن أن يكون في أحد اتجاهين متعاكسين فيجب أن يكون لكل حالة مستويان مختلفان من الطاقة وهذا الغرض يسمح بتفسير النتائج الطيفية التي حصل عليها بيتر زيمان.

تمّ إطلاق اسم اللفّ الذاتي على هذه الخاصة المغناطيسية للإلكترون. ولكن الحسابات الأكثر تطوّراً والمبنية على النظرية الكهرطيسية أثبتت أن فكرة دوران الشحنة الكهربائية للإلكترون حول نفسها تتعارض مع بعض النتائج، وتمّ التخلّي عن هذا التفسير، ولكنّ هذه الخاصة بقيت محتفظة باسم اللفّ الذاتي.

٢- الرياضيات تهبّ لنجدة الإلكترون

كيف يمكن تمثيل خاصة جديدة للمادة لا يوجد لها أي نظير محسوس في عالمنا؟ هذه الخاصة الجديدة للمادّة وهي اللفّ الذاتي موجودة في عدد كبير من الجسيمات الكمومية وقد وقف الفيزيائيون عاجزين أمامها ولأول مرّة يظهر أمامهم مقدار كمومي تماماً لا يوجد ما يشابهه في الفيزياء التقليدية.

وكان لابدّ من اللجوء إلى زمرة جديدة من الكيانات الرياضية المجرّدة أطلقوا عليها بهذه المناسبة اسم اللفّافات الذاتية لتمثيل الجسيمات ذوات اللف الذاتي. والجدير بالذكر هو أن إيلي كارتان اكتشف اللفافات الذاتية عام ١٩١٣ خلال أبحاثه

حول تمثيل المجموعات. ولكن الفيزيائيَّين باولي ثم ديراك أعادا اكتشاف اللفّافات الذاتية دون أن يطّلعا على أبحاث كارتان، واستخدماها في عامي ١٩٢٧ و١٩٢٨ لوصف هذه الخاصة الجديدة للجسيمات.

من قال إن المادّة ليست نسبوية؟

كان الفيزيائي ولفغانغ باولي (١٩٠٠- ١٩٥٨) أول من حاول تغيير معادلة شرودنغر لتضمينها خاصة اللف الذاتي، وذلك في عام ١٩٢٧ . ولكن تبين أن المعادلة التي حصل عليها، والمستندة إلى الميكانيك التقليدي ليست سوى صيغة تقريبية لمعادلة ديراك التي وجدها عام ١٩٢٨ .

كانت النتائج التي حصل عليها سومرفلد، بتطبيق النسبية الخاصة على نموذج ذرة بور لافتة للأنظار، لأنها سمحت بإيجاد البنية الدقيقة لمستويات طاقة ذرة الهيدروجين. وهكذا اتجه البحث لإيجاد معادلة نسبوية تخضع للمبادئ الجديدة للميكانيك الكمومي.

١ - معادلة أدهشت عالم الفيزيائيين

في عام ١٩٢٨ نجح بول ديراك (١٩٠٢- ١٩٨٤) في صياغة معادلة جديدة للموجة في ذرة الهيدروجين. وديراك الذي كان رياضيـاً ممتازاً بحث مسبقاً عن معادلة تحقق المبادئ العامة للنسبية الخاصة التي تنصّ على التكافؤ الرياضي بين المتغيّرات الزمانية والمكانية بالإضافة إلى أن تكون المعادلة لامتغيّرة عند تطبيق تحويل لورنتز، كما قبل أيضاً فكرة باولي، وهي أن الجسيم يجب أن يمثّل بعدد من توابع الموجة.

استوحى ديراك أسلوب صياغة معادلة شرودنغر، وبما أنه يبحث عن معادلة نسبوية، انطلق من التعبير النسبوي عن طاقة جسيم حر كتلته الخاصة ك. واندفاعه (كمية حركته) كه وهذه الطاقة هي:

$$ط = ض \sqrt{كه^2 + ك_{\cdot}^2 ض^2}$$

لصياغة معادلة على طريقة شرودنغر حيث يكون للمقادير التقليدية معنى أقرب إلى التجريدي توجد صعوبة، وهي وجود الجذر التربيعي ، وعبقرية ديراك قادته إلى إيجاد تعبير خطّي عن الطاقة ط وهكذا عبر عن الطاقة ط بالشكل :

$$ط = ض (\alpha \ كه + \beta \ ك_{\cdot} ض)$$

وإيجاد الكميتين α ، β اللازمتين للحصول على التعبير النسبوي للطاقة ط غير ممكن إذا اقتصرنا على الأعداد، ولو كانت عقدية . ولكن ديراك نجح في إيجاد معادلته بالتعبير عن كل من α و β بمصفوفة .

حصل ديراك على معادلة ستدهش عالم الفيزيائيين فهي لم تقتصر على إيجاد البنية الدقيقة لمستويات طاقة ذرة الهيدروجين، ولكنّها أدخلت أيضاً تعبيراً عن اللف الذاتي للإلكترون الذي فرض وجوده انطلاقاً من مبادئ عامة جداً . وبالإضافة إلى ذلك كانت القيمة المحسوبة للعزم المغناطيسي للإلكترون متفقة تماماً مع قيمته التجريبية .

وهي معادلة نسبوية صالحة لأنها لامتغيرة عند تطبيق تحويل لورنتز . ومن جهة أخرى، إذا كانت سرعة الإلكترون صغيرة جداً بالنسبة إلى سرعة الضوء يمكن إهمال بعض الحدود في معادلة ديراك وتصبح مماثلة لمعادلة باولي، وهذا تأكيد إضافي لصحة نظرية ديراك .

٢- ظهور المادة المضادة

ولكن لمعادلة ديراك مزايا أخرى : فقد فتحت الباب أمام عالم مجهول من الجسيمات الجديدة . وبعض حلول معادلة ديراك ترتبط بها طاقات سالبة ويبدو أن هذا لا معنى له . لنفرض مثلاً أن لدينا جسيماً نسبوياً مشحوناً كتلته الخاصة $ك_{\cdot}$ يتحرك بحريّة بسرعة سر ، ستكون طاقتـه الحركية $ك_{\cdot}$ سر^2 / ٢ وطاقته الخاصة $ك_{\cdot}$ ض^2 ولا شك في أن مجموع هاتين الطاقتين سيكون موجباً دوماً . وخلال

بضع سنوات كانوا ينظرون إلى حلول معادلة ديراك ذات الطاقة السالبة على أنها عيب في المعادلة. ولكن ديراك من جهته كان يفكّر في تفسير لهذه الطاقات السالبة وكان إيمانه بمعادلته يفوق إيمانه بالجسيمات التي كانت معروفة عندئذ. ومن الناحية الرياضية كانت الحلول ذات الطاقة السالبة تؤلف مع الحلول ذات الطاقة الموجبة مجموعة تامة ضمن فضاء حلول معادلة ديراك، ولايمكن إنكار وجودها. ولكنّ الإلكترون ذا الطاقة السالبة سيتحرك بتأثير القوة الكهربائية باتجاه معاكس لحركة الإلكترونات العادية ذات الطاقة الموجبة.

ولذلك توقّع ديراك، عام ١٩٣٠ وجود إلكترون موجب أي جسيم يساوي الإلكترون في كتلته، ولكنه يحمل شحنة كهربائية موجبة. وبعد سنتين تحقق كارل أندرسون (١٩٠٥- ١٩٩١) من وجود إلكترونات موجبة عند تفاعل الأشعة الكونية مع المادّة. وهذه الأشعة هي إشعاعات كهرطيسية ذات أطوال موجة قصيرة جداً من رتبة ١٠-١٢م. وعندما تصادف هذه الإشعاعات حاجزاً ماديّاً تتلاشى متحولّة إلى جسيمين أحدهما إلكترون سالب والآخر إلكترون موجب أو بوزيترون.

وبالعكس، عند تصادم الإلكترون والبوزيترون يتلاشى الجسيمان وينشأ إشعاع كهرطيسي مؤلف من فوتونين يمكن حساب طول موجتهما بسهولة. وذلك بأن نحسب الطاقة الناتجة عن تلاشي الكتلة ٢ ك أي مجموع كتلتي الإلكترون والبوزيترون وفقاً لمعادلة أينشتاين ط = ٢ك ض٢ ثم نحسب تردّد الإشعاع من معادلة بلانك ط = هـ ن ونحصل على طول موجة يساوي ٤,٢ × ١٠-١٢م وهو موافق تماماً للقيمة التجريبية، وهذا تأكيد مباشر على صحة نظرية أينشتاين وعلاقته الشهيرة. بعد معرفة ظاهرة الإفناء المتبادل عند لقاء إلكترون مع بوزيترون تم إطلاق تسمية مادة مضادة أو جسيمات مضادة على البوزيترون وأمثاله. وقد اكتشفوا بعد ذلك أن لكل نوع من الجسيمات جسيماً مضاداً له. وفي عام ١٩٥٧ اكتشفوا البروتون المضاد ذا الشحنة الكهربائية السالبة ولقاء الجسيم وجسيمه المضاد يؤدي دائماً إلى اختفائهما وانتشار طاقة مكافئة لكتلتيهما.

الفصل السادس

معذرة يانيوتن

معذرة يا نيوتن فقد فتحت طريقًا لايقدر على العثور عليه في عصرك سوى إنسان يتمتع بذكاء لامع وبذهن مبدع. والمفاهيم التي طوّرتها مازالت حتى الآن تقودنا في دراستنا للفيزياء، مع أننا نعرف الآن أن من الضروري إحلال مفاهيم أخرى محلّها، وهي مفاهيم قد تكون بعيدة إلى حدّ ما عن التجربة المباشرة إلا أنها هي وحدها التي ستسمح لنا بإدراك أعمق للعلاقات بين الأشياء.

هذا ما عبّر عنه أينشتاين عام ١٩٤٩ في **ملاحظات حول السيرة الذاتية** وقد جعل نفسه، بشيء من الفكاهة، ندًّا لإسحق نيوتن. وفي الحقيقة، لم يقتصر أينشتاين على هدم فكرتي المكان المطلق والزمان المطلق لدى نيوتن وذلك عندما وضع أسس النسبية الخاصة، فقد أعاد أيضًا النظر بصورة معمّقة في المفهوم النيوتني للجاذبية العامّة. وبتطوير نظريته النسبية عن الجاذبية العامة قلب أينشتاين رأسًا على عقب بعض المفاهيم الأساسية في الفيزياء.

النسبية خاصة جدًا

١- أينشتاين غير مكتفٍ بما أنجزه

سبب تسمية نسبية عام ١٩٠٥ بأنها خاصة هو أن مبدأ النسبية خاص بالمراجع الغاليلية، أي التي تتحرك بحركة انسحابية منتظمة بالنسبة إلى بعضها بعضًا. ولكن

أينشتاين طرح التساؤل التالي: يمكن أن يكون المرجع متسارعاً، فلماذا يقتصر بحثنا على نوع من المراجع دون غيره؟ وقوانين الطبيعة يجب أن تكون أكثر عمومية وألا تتعلق بنوع المراجع التي تدرس فيها.

بالإضافة إلى هذا السخط الذي أظهره أينشتاين تجاه نظريته نفسها كان هناك مصدر آخر لعدم الرضا. فالمكان- الزمان الرباعي الأبعاد والناشئ عن جمع الزمان والمكان اللذين لم يعد كل منهما بمفرده مطلقاً أصبح هو بدوره مطلقاً. تحوّل إلى إطار خالد ولا متناه يجب أن تحدث داخله حوادث الكون كلّها.

ولكنّ أينشتاين تأثّر بأفكار إرنست ماخ (١٨٣٨- ١٩١٦) وهو فيزيائي أطلق اسمه على وحدة السرعة المساوية لسرعة الصوت والمستخدمة في الطيران. وهكذا توصل إلى التفكير بأن الزمان- المكان المطلق يجب ألا يكون له معنى فيزيائي.

والزمان- المكان هو في الحقيقة إطار فارغ، أو كيان مجرّد، ورأى أينشتاين أنه يجب أن يتأثر، بشكل ما، بمحتواه من المادة والطاقة.

٢- النسبية العامة

تتجلّى العبقرية العلمية في طرح الأسئلة الملائمة والقدرة على إيجاد الإجابات الصحيحة وقد بدأ أينشتاين منذ عام ١٩٠٦ بتطوير نظرية أكثر شمولاً تحتوي النسبية الخاصة وذلك لحلّ المسائل التي قد تطرح، وعمل أكثر من عشر سنوات للتوصل إلى نظرية مقبولة.

في عام ١٩١٦ نشر أينشتاين أُسُس هذا الجزء من أعماله والذي يدعى النسبية العامة. وسنرى أنه اتّبع أسلوباً مبتكراً يعمم مبدأ النسبية على مراجع لا تقتصر على كونها متحركة بحركة انسحابية منتظمة بالنسبة إلى بعضها بعضاً بل يمكن أيضاً أن تكون متسارعة. وهي تتضّمن في الوقت نفسه بناء نظرية نسبية للجاذبية العامة، لأن قانون نيوتن التقليدي لايبقى غير متغير إلا من خلال تحويل غاليله. وأخيراً،

وبينما تدرس الفيزياء التقليدية الأجسام الماديّة ضمن المكان النيوتني المطلق، وضع أينشتاين نظرية للإطار الزماني المكاني الرايماني (نسبة إلى رايمان) الوثيق الصلة بمحتواه المادي.

توالت الإثباتات التجريبية لتؤكد صحة النسبية العامة، وبالإضافة إلى ذلك ستسمح هذه النظرية، وللمرّة الأولى في تاريخ الفكر، بتصور **علم كون** أي نظرية للكون بمجموعه مبنية على أسس علمية بينما لم يكن يوجد في السابق سوى فرضيات نابعة من خيال واضعيها.

الجاذبية العامة عند نيوتن

يبين علم التحريك النسبوي الجديد الذي وضعه أينشتاين ضمن إطار النسبية الخاصة ضرورة وجود فيزياء تكون قوانينها بكاملها لامتغيرة ضمن تحويل لورنتز. صحيح أن كهرطيسية مكسويل تخضع لهذا المعيار ولكن ذلك لاينطبق على قانون نيوتن في الجاذبية العامة.

١- الأجسام كلّها تتجاذب

بعد أبحاث استغرقت ٢٠ سنة وضع يوهانس كبلر (١٥٧١- ١٦٣٠) قوانينه التجريبية الثلاثة المتعلّقة بحركة الكواكب حول الشمس. وللوصول إلى هذه النتيجة استخدم عدداً هائلاً من عمليات الرصد الفلكي الذي جمعها سلفه تيخوبراهه (١٥٤٦- ١٦٠١).

قوانين كبلر التجريبية أتاحت بعد ذلك لنيوتن اكتشاف قانون الجاذبية العامة المنشور عام ١٦٨٧ في كتابه **المبادئ الرياضية لفلسفة الطبيعة**.

يمكن التعبير ببساطة عن هذا القانون: كل كتلتين ك، ك ج، تفصل بين مركزيهما مسافة ر، تؤثّر كل منهما على الأخرى بقوة جاذبة ق باتجاه المستقيم الواصل بين مركزي الكتلتين. هذه القوة متناسبة مع جداء الكتلتين ومتناسبة عكسيّاً مع مربع المسافة ر أي:

$$ق = ثا \frac{ك\ ك_{ج}}{ر^{2}}$$

قيمة ثابت التناسب ثا صغيرة جداً لحسن الحظ وإلا لبقينا ملتصقين بسطح الأرض. وقيمة تسارع الثقالة ج تتعلق بالثابت ثا ولو كان هذا الثابت كبيراً لانسحقنا بسرعة عند سقوطنا على الأرض.

يطلق على الكتل مثل ك، $ك_{ج}$ اسم **الكتل الجاذبية** أو الكتل الثقالية، ويمكن القول إن تأثير هذه الكتل هو توليد قوة التجاذب، ويمكن تشبيهها «بشحن» ثقالية تتجاذب فيما بينها.

٢- نيوتن والنواس

وضع نيوتن أيضاً قانوناً أساسيًّا آخر وهو قانون تحريك جسم كتلته $ك_{ع}$ يخضع لقوة ق وتسارعه تع متناسب مع القوة أي ق = $ك_{ع}$ تع. يطلق على الكتلة $ك_{ع}$ اسم الكتلة العطالية.

لاشيء يؤكد مسبقاً أن الكتلة التجاذبية لجسم ما يجب أن تكون متناسبة مع كتلته العطالية. ومع ارتباط هاتين الكتلتين بالكمية نفسها من المادّة لجسم بعينه إلا أنهما تتعلقان بظاهرتين فيزيائيتين مختلفتين: إحداهما التجاذب والأخرى التسارع.

وقد يخطر لنا أن النسبة $ك_{ج} / ك_{ع}$ قد تختلف بحسب المواد المكونة للأجسام ولكن نيوتن سلّم بعكس ذلك، أي إن هذه النسبة مستقلة عن طبيعة المادة.

وللتحقق تجريبياً استخدم نواساً مؤلفاً من كتلة صغيرة معلّقة بخيط طويل. والحساب النظري لدور الاهتزازات الصغيرة يؤكّد أنه متناسب مع $\sqrt{ك_{ج} / ك_{ع}}$ تمّ قياس الدور بدقة نسبية تبلغ 10^{-3} باستخدام كتل مصنوعة من مواد مختلفة: ذهب، فضة، رصاص، زجاج، رمل، ملح، خشب، ماء، قمح. هذه القياسات

سمحت لنيوتن بالاستنتاج أن النسبة $ك_ج / ك_ع$ ثابتة ومستقلة عن طبيعة المادة المكوّنة للكتلة.

أجريت فيما بعد تجارب كثيرة أكثر دقة للتحقق من ثبات هذه النسبة بين الكتلتين التجاذبية والعطالية. وبين عامي ١٨٨٩ و ١٩١٩ توصل الفيزيائي ر. ف. يوتفوس إلى دقة نسبية $١٠^{-٨}$ ووصلت بعض التجارب عام ١٩٧١ إلى دقة $١٠^{-١٢}$.

وهكذا تكون النسبة $ك_ج / ك_ع$ ثابتاً عاماً مستقلاً عن طبيعة المادة. وباختيار جملة مناسبة للواحدات القياسية يمكن أن نختار لهذه النسبة قيمة مساوية للواحد أي $ك_ج = ك_ع$.

نلاحظ أن قانون التجاذب العام يختلف بصفة أساسية يتميز بها عن القوى الأخرى المعروفة في الفيزياء. فالتسارع تع الذي تؤثر به قوة ق على كتلة ك يتعلّق بهذه الكتلة لأن تع = ق/ك أما الجسم الموضوع داخل حقل جاذبية ناشئ عن كتلة كـ فإنه يكتسب تسارعاً مستقلاً عن كتلته:

لأن تع = ق/ك = ثا كـ/ $ر^{٢}$.

مبدأ التكافؤ:

عندما وضع نيوتن مبدأ التطابق بين الكتلتين التجاذبية والعطالية لم يفعل سوى التعبير عن نتيجة تجريبية حولّها إلى مسلّمة، ولكنه لم يفسّرها. ولكن ما كان أينشتاين يبحث عنه هو التفسير النظري لهذا التطابق. وفي عام ١٩٠٦ لم يستطع التوصل إلى هذا التفسير بالاستناد إلى مبادئ النسبية الخاصة وحدها.

وفي عام ١٩٠٧ خطرت لأينشتاين «أسعد فكرة في حياته». كما وصفها فيما بعد. أدرك أن «الإنسان في حالة السقوط الحرّ لا يشعر بثقله الخاص». وللإحساس بهذه الحالة من انعدام الثقالة لابد من إجراء السقوط الحرّ في الخلاء دون استخدام

مظلة واقية. ولكن لإدراكها يكفي أن نتذكر أن الثقل ناتج عن تأثير تسارع الثقالة في الكتلة. والسقوط الحرّ يلغي بالنسبة إلى الجسم تأثير الثقالة.

١- غرفة بين مجرّتين

تأملات أينشتاين المتعلقة بسقوط الأجسام قادته إلى القبول بأن حقل الثقالة في كل نقطة هو حقل تسارعات وبذلك تتطابق الكتلتان الثقالية والعطالية. ولإيضاح فكرته تصوّر تجربة ذهنية يكون فيها المجرّب بعيداً جداً عن أية كتلة جاذبة كبيرة، في مكان ما بين مجرّتين مثلاً. كتب أينشتاين:

> **لنتصور جملة مقارنة مؤلفة من علبة كبيرة على شكل غرفة وفي داخلها مجرّب ومعه أجهزة. ولاشك في أن الثقالة غير موجودة بالنسبة إلى هذا المجرّب. وعليه أن يثبت جسده بحبال إلى أرض الغرفة لئلا يطير ببطء إلى سقفها عند أي اصطدام له مع أرضها.**
>
> **لنفرض أيضاً وجود خطاف مثبت بسطح الغرفة من الخارج وهو مربوط بحبل وأن كائناً ما بدأ بشد هذا الحبل بقوّة ثابتة. ستبدأ الغرفة وبداخل المجرّب عندئذ بالطيران بحركة متسارعة بانتظام نحو «الأعلى».**

لنفرض أن الرجل واقف على أرض الغرفة ويندفع معها بحركة متسارعة. وإذا أفلت هذا الرجل جسماً كان يمسكه بيده فإن تسارع الغرفة لن ينتقل إلى هذا الجسم وسيسقط هذا الجسم نحو أرض الغرفة بحركة نسبية متسارعة. **ومهما كانت كتلة الجسم المتروك فإن تسارع حركته نحو أرض الغرفة ستكون هي نفسها دائماً**. وقد عرفنا أن ذلك هو خاصة أساسية لحقل الجاذبية.

سيظن المجرّب الموجود داخل الغرفة أنه، هو والغرفة، داخل حقل جاذبية لايتغير مع الزمن، وإذا نظر إلى الخارج ورأى الحبل المشدود المربوط بالغرفة

سيظن أنها معلّقة بجسم آخر وأن ذلك هو سبب بقائها ساكنة داخل حقل الجاذبية دون أن تسقط.

نصل الآن إلى تفسير أينشتاين للتطابق بين الكتلتين الثقالية والعطالية.

لنفرض أن الرجل ثبّت حبلاً بسقف الغرفة وعلق جسماً بالنهاية الحرة لهذا الحبل. بتأثير الجسم المعلق سيبقى الحبل مشدوداً «بوضع شاقولي» وإذا تساءلنا عن سبب كون الحبل مشدوداً سيجيب الرجل الموجود داخل الغرفة: «الجسم المعلّق خاضع بتأثير حقل الجاذبية إلى قوّة متجهة نحو الأسفل تتوازن مع قوة الشدّ في الحبل. وقوة الشدّ في الحبل متناسبة مع الكتلة الثقالية للجسم المعلّق. أما المشاهد الذي يسبح بحريّة في الفضاء فسيفسّر الحالة كما يلي: «الحبل مجبر على الإسهام في الحركة المتسارعة للغرفة وينقل هذه الحركة إلى الجسم المربوط به وتوتر الحبل هو الذي يعطي تسارعاً لهذا الجسم، ومقدار توتّر الحبل متناسب مع الكتلة العطالية للجسم».

ونرى حتمية التساوي بين الكتلة التجاذبية والكتلة العطالية لأن «مقدار توتر الحبل» هو نفسه.

٣- التكافؤ بين التجاذب والعطالة

في التجربة الذهنية السابقة لايوجد تمييز بين قوتي التجاذب والعطالة إلا بسبب وجهة النظر التابعة لموقع المشاهد. يتحدّث الرجل داخل الغرفة عن التجاذب بينما يتحدّث الموجود في الخارج عن ظاهرة عطالية. فالقوتان إذن متكافئتان. ومع ذلك لابد من تحديد شروط التكافؤ بين مفهومي التجاذب والعطالة. قد يخطر لنا أنه، مهما كان حقل التجاذب يمكننا دائماً إيجاد جملة مقارنة متسارعة تعطينا حقل تسارع مكافئ. وهذا لايحدث في الحالة العامة. والمثال على ذلك حقل جاذبية الأرض إذ لا توجد أية جملة متسارعة أو متحركة بحركة دورانية تطابق حقل الجاذبية الأرضية بكامله.

ومبدأ التكافؤ بين التجاذب والعطالة الذي صاغه أينشتاين لايطبق إلا على فضاء محدود أي

إن حقل التجاذب يكافئ موضعياً حقل تسارع

ولايمكن إلا موضعياً إبدال القوى التجاذبية بقوى عطالية أو بالعكس. .

مبدأ النسبية العامة

غرفة أينشتاين الموجودة بين المجرّات تتحرك بتسارع ثابت بالنسبة إلى جملة مقارنة غاليلية يمكن أن نضعها على مجرّة بعيدة مثلاً. ولكن المشاهد المرتبط بهذه الغرفة والتي هي جملة مقارنة بالنسبة إليه، يرى أنه ساكن ضمن حقل جاذبية، وطريقته في إدراك الأمور لاتخالف قوانين الميكانيك.

قد يخطر لنا إذن أن قوانين الفيزياء في جملة مقارنة متسارعة مماثلة في صيغها لهذه القوانين نفسها عندما ينظر إليها داخل جملة مقارنة نفرض أنها ساكنة. .

وهكذا نكون وسّعنا مبدأ نسبية غاليله الذي يقتصر على جملة مقارنة مفضّلة. وهذا التوسيع مرتبط ارتباطاً وثيقاً بمبدأ التكافؤ بين التجاذب والعطالة ويقوم بدور أساسي في نظرية النسبية العامة.

وهكذا وسّع أينشتاين مبدأ نسبية غاليله وفرض أن قوانين الطبيعة كلّها يجب أن يكون لها الشكل نفسه في جمل المقارنة كلّها، يمكن التعبير عن **مبدأ النسبية العامة** بالطريقة البسيطة التالية :

كل جمل المقارنة، مهما كانت حالة حركتها، هي متكافئة فيما يخص صياغة قوانين الطبيعة.

ولكننا سنرى فيما يلي أن الفكرة الأساسية لهذا المبدأ بحاجة إلى التعبير عنها بمزيد من التجريد لتكون دقيقة تماماً.

ولاشك في أن مثل هذا المبدأ بحاجة إلى إثبات عن طريق نتائجه النظرية والتجريبية . وتعميم مبدأ النسبية بهذه الطريقة يحتاج إلى بعض الجرأة ، لأن المشاهدات المألوفة قد تبدو مناقضة لهذا التعميم ، لنأخذ مثلاً قطار أينشتاين الذي إذا توقف فجأة بسبب ضربة قوية على المكابح فإننا سندفع إلى الأمام ، ويبدو صعباً أن نقبل أن قوانين الميكانيك في الجملة المتسارعة هي نفسها في الحركة الانسحابية المنتظمة .

ولكن ذلك ممكن إذا لاحظنا أن جملة المقارنة عندما يسود فيها حقل تسارعات فإن المقادير المميزة لهذا الحقل ستدخل ضمن التعبير عن قوانين الطبيعة ، وينعدم هذا الحقل في الجملة الغاليلية وتأخذ القوانين العامة شكلاً مبسّطاً . ومعادلات مكسويل مثلاً هي الشكل المبسط لمعادلات أكثر شمولاً وضعها أينشتاين ، ويدخل فيها حقل الجاذبية . واللافت للنظر هو أن قوانين الكهرطيسية بشكلها الأكثر شمولاً بسيطة جداً ، وتبدو أكثر وضوحاً من قوانين مكسويل . ولاشك في أن قوانين مكسويل قد وضعت استناداً إلى التجربة ، وبما أن حقل جاذبية الأرض والقوة النابذة الناتجة عن دورانها ضعيفا التأثير على الظواهر الكهرطيسية إلى حدّ لايمكن معه ملاحظة هذا التأثير . وقوانين مكسويل دقيقة إلى درجة كافية ضمن بيئة أرضية حيث تطبّق الهندسة التقليدية المسماة أيضاً الهندسة الإقليدية (نسبة إلى إقليدس) .

وبصورة عامة تبقى نظرية النسبية الخاصة صحيحة ولكن في حالة مثالية : وهي انعدام حقل التسارع (أو حقل الجاذبية المكافىء له) .

الفصل السابع

إقليدس، رايمان والآخرون

المبدآن الكبيران: مبدأ النسبية العامة ومبدأ التكافؤ هما أساس نظرية النسبية العامة. ولكن هذين المبدأين ليسا الآن سوى فرضيتين، وكغيرهما من الفرضيات لا قيمة لها إلا بالنتائج التجريبية التي يمكن استخراجها منهما.

وقبل الوصول إلى ذلك، كان على أينشتاين أن يضع أولاً نظرية نسبية للجاذبية العامة، وكان ذلك هو هدفه الأول، ثم تطبيقها على حالات خاصة لتكون اختباراً لصحة النظرية. سيستغرق العمل زمناً طويلاً، لأن المبدأين الأساسيين سيقودانه في الحقيقة إلى قانون جديد يحتوي علم التحريك بكامله.

استخدم أينشتاين ترسانة رياضية كاملة لصياغة نظريته، سنعرض لمحة موجزة جداً عنها وسيخصّص هذا الفصل بصورة رئيسية لتحديد بعض التعاريف التي ستفيدنا فيما بعد.

الشكوك تخيّم على إقليدس

تبدو هندسة إقليدس لنا وصفاً صحيحاً للفراغ الفيزيائي الثلاثي الأبعاد. وهكذا يقال عن هذا الفراغ إنه إقليدي، ولكن خلال القرن التاسع عشر بدأت الشكوك تواجه هذه الهندسة التي كان يبدو أنها تصف الكون وصفاً جيّداً جداً.

ونذكر بصورة خاصة أن برنهارت رايمان (١٨٢٦ - ١٨٦٦) اخترع هندسة

جديدة سيستخدمها أينشتاين بعد ٦٠ سنة تقريباً. سنرى ضمن مثال السبب الذي دعا أينشتاين إلى الغوص داخل متاهات فضاءات رايمان.

١- الهندسة فوق قرص دوّار

أدرك أينشتاين سريعاً أن النسبية الخاصة تحتاج إلى التخلّي عن الهندسة الإقليدية فيما يخص بعض جمل المقارنة المتحركة بحركة متسارعة.

لنأخذ مثال قرص مستوٍ يدور حول محور مار من مركز القرص م وعمودي على مستواه. لنأخذ مسطرة قصيرة جداً بالمقارنة مع أبعاد القرص طولها الخاص ل. بالنسبة إلى مشاهد ساكن عند مركز القرص. يمكن عدّ هذا المشاهد موجوداً داخل جملة مقارنة غاليلية ثابتة ج.

لنضع المسطرة عند محيط القرص في نقطة ن بحيث تكون مماسة لدائرة نصف قطرها (ر) ومركزها (م). فهي إذن موازية للسرعة سر التي تتحرك بها النقطة ن. بالنسبة إلى المشاهد الموجود في جملة المقارنة ج، حيث يمكن تطبيق نظرية النسبية الخاصة تكون المسطرة الموجودة في ن متحركة بالسرعة سر. ويحدث تقلّص في طول المسطرة. ويكون طولها وفقاً لنظرية النسبية الخاصة ل= ل. γ (سر).

أما إذا وضعت المسطرة على امتداد المحور، عمودية على الحركة فإن طولها يبقى دائماً ل. وقياس المحيط (ط) للدائرة التي نصف قطرها ر كما يبدو للمشاهد الغاليلي هو: ط = ٢ π ر γ (سر).

والنسبة بين المحيط ونصف القطر هي إذن ٢ π γ (سر) وهي أكبر من ٢ π لأن γ (سر) هو دائماً أكبر من الواحد. وبالإضافة إلى ذلك، تزداد هذه النسبة عندما نبتعد من المركز نحو المحيط.

ولذلك لاتكون نسبة المحيط إلى نصف القطر مساوية إلى ٢ π تماماً كما تقول الهندسة الإقليدية في حالة دوران القرص ولكن يجب أن تكون السرعة كبيرة

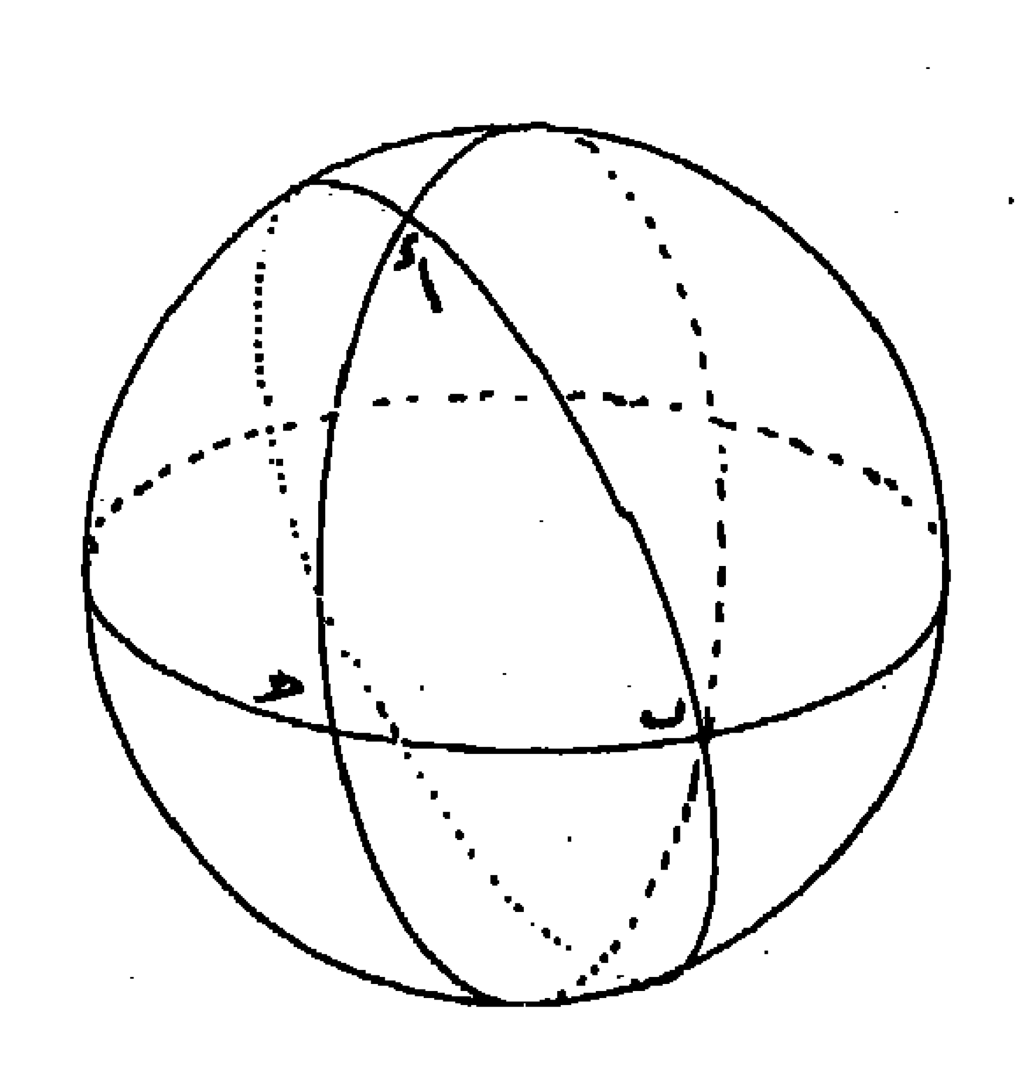
لنســــتطيع رؤيــة هذا الاخــتلاف. والقـرص الدوّار هو مـثـال على فـضـاء رايمان الثنائي الأبعاد.

وهندسـة هذا القرص ليست إقليدية مع أنها تتعلق بسطح مستو ذي حقيقة فيزيائية. ووفقًا لمبدأ التكافؤ يمكن عدّ هذا السطح مغموراً داخل حقل جاذبية يكافئ الحقل العطالي الناتج عن التسارع في كل نقطة من القرص. فهل هناك ارتباط بين الجاذبية والهندسة؟

٢- الهندسة على سطح كرة

لنشاهد الآن أحد فضاءات رايمان التقليدية: إنه سطح كرة بصفته فضاءً **ثنائي** الأبعاد. لندرس خواص الأشكال الهندسية المرسومة على سطح كرة.

لنتصوّر كائنات صغيرة جداً ومستوية إلى أقصى حدّ تزحف على هذا السطح الكروي. مـا هو أقـصـر طريق للانتقال من نقطة أ إلى نقطة ب موجودتين على سطح الكرة؟ لايمكن أن يكون خطًا مسـتـقـيمـًا إذ لايمكن الانتقال إلا داخل هذا الفضاء الثنائي الأبعـاد، أي على سطح الكرة، إن أقصر طريق هو قوس من دائرة عظمى



شكل ٧-١

تمّر بالنقطتين أ ، ب كما نرى على الشكل ٧-١ . وبصورة عامة، أقصر طريق بين نقطتين على أي سطح يدعى **خطًا جيوديزيًا**.

نحصل على مثلث على سطح كرة بأن نصل ثلاث نقاط أ ، ب، جـ مثنى مثنى بثلاثة خطوط جيوديزية (شكل ٧-١) يمكن البرهنة بسهولة على أن مجموع زوايا مثلث كهذا لاتساوي ١٨٠ درجة بل تتراوح بين ١٨٠ و ٥٤٠ درجة. والهندسة

إذن ليست إقليدية بالنسبة إلى الكائنات الثنائية الأبعاد التي تزحف على سطح كرة. مقلوب مربع نصف القطر ر لكرة يدعى **انحناء السطح** وهو مقدار موجب.

تحديد المواقع لدى رايمان

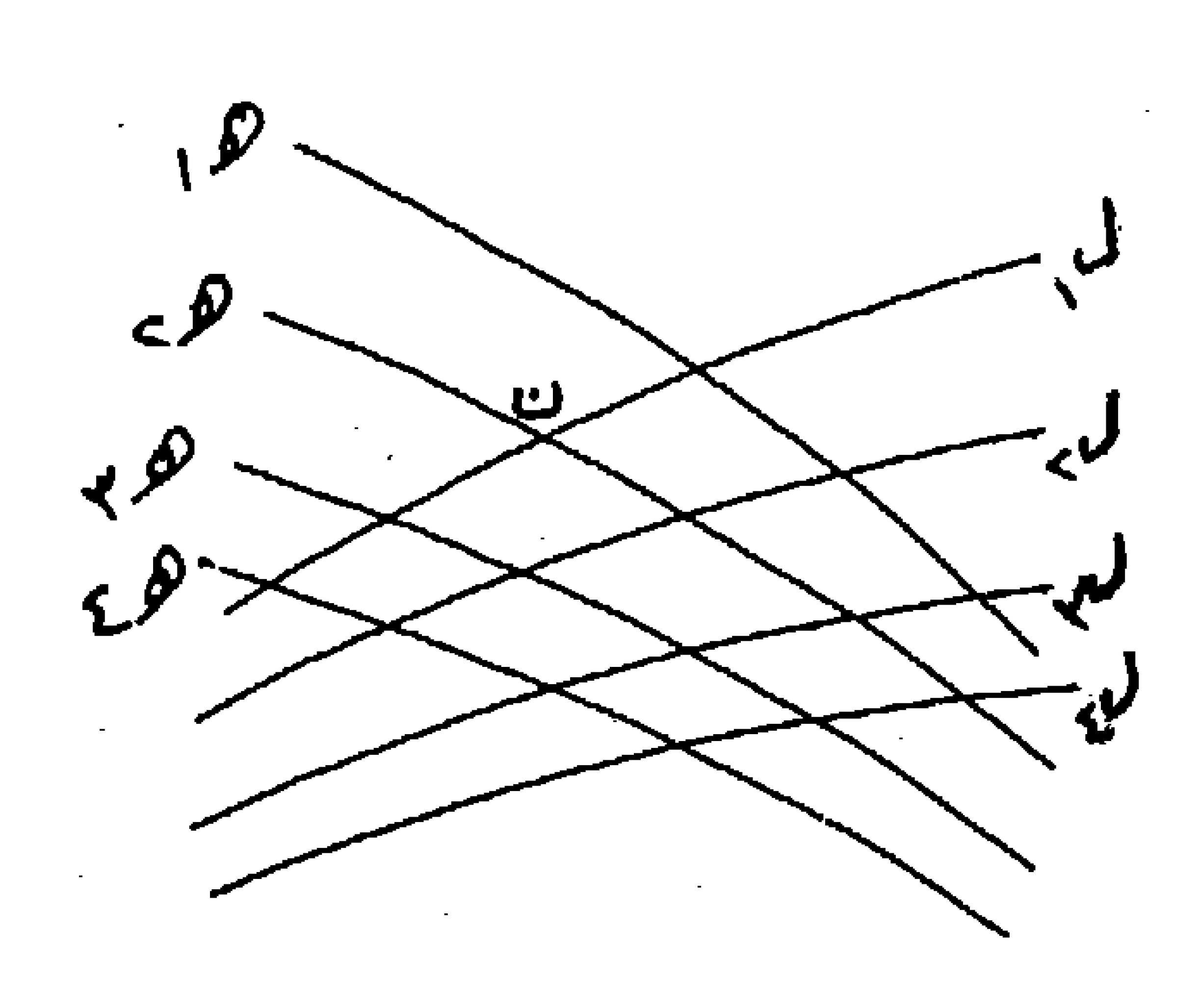
نعبّر عن قوانين الميكانيك بدلالة الإحداثيات المكانية والزمانية ومع أن زمان-مكان مينوفسكي ليس إقليدياً فعلاً فقد رأينا أننا نستطيع إرجاعه إلى فضاء إقليدي بإدخال متغير تخيّلي و = ت ض ز بدلاً من الزمن. وهكذا يمكن بسهولة تحديد الموقع في الزمان- المكان الممثل بجمل مقارنة إحداثياتها محمولة على خطوط مستقيمة. فهل يمكن فعل ما يشبه ذلك في فضاء رايمان؟

١- من خط الاستواء إلى غرينتش

كيف نحدّد موقع نقطة على سطح كرة؟ هذه المسألة حلّها الجغرافيون منذ زمن طويل لتحديد موقع نقطة على سطح الأرض.

ولذلك نرسم مجموعة من الدوائر الموازية للدائرة العظمى الاستوائية ونرقّم هذه الدوائر . وكل نقطة ستوجد على دائرة تحدّد **درجة عرض المكان** ونرسم أيضاً مجموعة من الدوائر العظمى المارّة من القطبين وهي تحدّد **درجة طول النقطة**. هذه الدوائر هي أيضاً مرقّمة بدءاً من دائـــرة تمّ اختيارها تمرّ من إحدى ضواحي لندن في موقع مرصد غرينتـــش القديم الذي أنشـــأه تشارلز الثاني عام ١٦٧٥ . درجتا الطول والعـرض تحـدّدان مـوقع نقطة عند تقـاطع دائرتين على سطـــح الكرة الأرضية. وطريـــقة تحديد موقع نقطـــة على سطح ما مستوحاة من الطريقة المستخدمة على الكرة الأرضية. يمكننا دائماً أن نرســـم على ســـطح مجموعة منحنيات لا تتقاطع فيما بينها ونرقّمها بصـــورة اختياريـــة ابتداء من أحـــدها $هـ_1 = 1$ ، $هـ_2 = 2$ الخ. (شـــكل ٧-٢) ومـجموعـــة أخرى من المنحنـــيات التي لا تتقـاطع فـيمـا بينهـا أيضاً ونرقّـمهـا $ل_1 = 1$ ، $ل_2 = 2$ الخ وهي تقطع مجموعـــة المنحنـــيات هـ. وهكـــذا نجد أن إحداثيي النقطـــة ن على الشكل

٧-٢ همــا هـ=٢، ل=١ . ويمكننا دائمـاً أن نرسم منحنيــات أخــرى تتــوسط بين $هـ_{١}$ ، $هـ_{٢}$ مــثــلاً وهكذا يرقّم كل من هذه المنحنيــات برقم كســري مــحــصــور بين $هـ_{١}$ ، $هـ_{٢}$ مجموعتا العالم هـ، ل هما جملة **إحداثيات غاوس**.



شكل ٧-٢

يجري ترقيم إحداثيات غاوس بحيث يتم تمثيل النقطتين المتقاربتــين قرباً لامتناهياً بأعداد لاتختلف عن بعضها بعضاً إلا اختلافاً لامتناهــياً في الصــغر. وهكذا يكون الســطح فضاء متّصلاً ثنائي الأبعاد.

٢- رايمان يقوم بزيارة إلى فيثاغورس

الخواص الهندسية للأشكال الموجودة على سطح ما ستتغيّر من نقطة إلى أخرى ولابد إذن من وجود طريقة لإجراء قياسات **موضعية**.

كيف نقيس المسافة ء ف بين نقطة ن إحداثيا غاوس لها هما هـ، ل ونقطة أخرى نَ قريبة منها قرباً لامتناهياً وإحداثياها هما هـ + ء هـ، ل + ء ل؟

برهن غاوس أن مربع المسافة على السطح تعطى بالعلاقة:

$$\text{ء ف}^{٢} = \text{ج}_{١١}\,\text{ء هـ}^{٢} + \text{ج}_{٢١}\,\text{ء هـ ء ل} + \text{ج}_{١٢}\,\text{ء ل ء هـ} + \text{ج}_{٢٢}\,\text{ء ل}^{٢}$$

وأثبت أيضاً أن $ج_{٢١} = ج_{١٢}$. وفي سطح مــا تتــعلق الكميــات $= ج_{١١}$ ، $ج_{٢١}$، $ج_{٢٢}$ بكل من هـ ، ل بطريقة محدّدة تماماً وإذا كنا نعرف هذه التوابع الثلاثة نستطع حساب طول ء ف بمعرفة كل من ء هـ، ء ل. يمكننا القول إن معرفة $ج_{١١}$ ، $ج_{٢١}$، $ج_{٢٢}$ بدلالــة هـ، ل تســمح بقياس الفضاء الثنائي الأبعــاد، والأمثال

$ج_{11}$، $ج_{21}$، $ج_{22}$ هي مركّبات الكمية الممتدّة المقياسية وهي تميّز هندسة فضاء رايمان ثنائي الأبعاد.

التعبير عن ء $ف^2$ يشبه تعميمًا لنظرية فيثاغورس. وفي الحقيقة، نعلم في الهندسة الإقليدية أنه اذا كان لدينا مثلث قائم الزاوية ضلعاه القائمان هما ء هـ، ء ل فإن طول الوتر ء ف يحدّد بالعلاقة ء $ف^2$ = ء $هـ^2$ + ء $ل^2$ وهي حالة خاصة من معادلة غاوس إذا وضعنا $ج_{11}=1$، $ج_{21}=ج_{12}=0$، $ج_{22}=1$.

بوضع ثلاثة توابع قابلة للاشتقاق $ج_{11}$، $ج_{21}$، $ج_{22}$ بحيث لايؤدي أي تغيير في الإحداثيات إلى وضع ء ف2 بالشكل التقليدي ء $ف^2$= ء $هـ^2$ + ء $ل^2$ فإننا نعرّف فضاء رايمان ثنائي الأبعاد. ويوجد إذن عدد لامتناه من فضاءات رايمان.

حساب الكميّات الممتدة في الفيزياء

تحتاج النسبية العامة إلى استخدام كائنات رياضية تدعى الكميّات الممتدة. وقد وضعت لوصف الخواص الفيزيائية التي لايمكن وصفها بمتّجهات عادية.

لقد تعرّفنا منذ قليل على كمية ممتدّة عند التعبير عن ء $ف^2$، والتوابع $ج_{11}$، $ج_{21}$، $ج_{12}$، $ج_{22}$ هي مركبّات الكمية الممتدة المقياسية لفضاء ثنائي الأبعاد، وتدعى أيضًا الكمية الممتّدة الأساسية لهذا الفضاء.

١- الخاصة الأساسية للكمية الممتدة

يمكن بصورة عامة تمييز الكمية الممتدة بمجموعة من المركّبات يتعلق عددها بعدد من العوامل منها عدد أبعاد الفضاء الذي يجري تعريفها ضمنه. وإحدى الخواص الأساسية للكميات الممتدة هي مايلي: إذا كانت مركّبات الكمية الممتدة معدومة كلها فستكون معدومة كلّها في أية جملة مقارنة يتم اختيارها عشوائيًا. وإذا كانت هذه المركّبات مساوية على الترتيب لمركّبات كمية ممتدة أخرى فستكون كذلك أيضًا في أية جملة مقارنة يتم اختيارها عشوائيًا.

وهكذا فكل قانون فيزيائي تتم صياغته بانعدام جميع مركّبات كمية ممتدة أو تتم صياغته بالتساوي بين كميتين ممتدتين سيكون مستقلاً عن جمل المقارنة.

٢- فضاء رايمان رباعي الأبعاد

هذه الخواص التي عرضناها لفضاءات رايمان الثنائية الأبعاد نستطيع أن نتخيل بسهولة إمكان تعميمها لتشمل فضاءات رباعية الأبعاد. وعندئذ ستكون إحداثيات غاوس أربعة س ع ص هـ . ومربع المسافة العنصرية في الفضاء الرباعي الأبعاد تكون:

$$ء ف^{٢} = ج_{١١}\, ء س^{٢} + ٢ ج_{٢١}\, ء س\, ء ع + ٢ ج_{٣١}\, ء س\, ء ص + \ldots + ج_{٤٤}\, ء هـ^{٢}$$

وعندئذ يكون للكمية الممتدة المقياسية ١٦ مركّبة. وهذه الكمية الممتدة هي متناظرة في فضاء رايمان أي $ج_{٢١} = ج_{١٢}$، $ج_{٣١} = ج_{١٣}$ الخ. وهكذا لايوجد سوى عشر مركّبات يمكنها أن تأخذ قيماً مختلفة.

٣- كميّة رايمان - كريستوفل الممتدة

انطلاقاً من الكمية الممتدة الأساسية يمكن تكوين كمية ممتدّة تقوم بدور هام في نظرية النسبية العامة، وهي **كمية رايمان- كريستوفل الممتدة.**

والتعبير عن مركّبات هذه الكمية الممتدّة معقد، وتدخل فيه مشتقات مركّبات الكمية الممتدة الأساسية، وبحساب عدد التبادلات الممكنة في فضاء رباعي الأبعاد نجد أن عدد المركّبات ٤×٤×٤×٤ = ٢٥٦ . وبسبب خواص التناظر يختصر هذا العدد في الحقيقة إلى ٢٠ مركّبة متميزة.

انحناء فضاء رايمان

تتصف فضاءات رايمان كلها بصفة الانحناء وتسمح كمية رايمان - كريستوفل الممتدة بحساب انحنائها. أما الفضاء الإقليدي فهو بالعكس غير منحن. ويمكن في

الحقيقة البرهنة على أن انعدام مركّبات كمية رايمان- كريستوفل الممتدة كلها هو الشرط اللازم والكافي ليكون الفضاء إقليديّاً.

ومع أن بالإمكان اختـــراع عـدد لامتنـــاه من الفضاءات الرايمانية إلا أنه لايوجد سوى فضاء إقليدي واحد. ونجد إذن في الفضاء الإقليدي الرباعي الأبعاد أن $ر^{ك}_{ل م ن} = ٠$ حيث ر ترمز إلى مركّبة كمية رايمان -كريستوفل الممتدة والأدلة ك، ل، م، ن تأخذ القيم ١، ٢، ٣، ٤.

وانطلاقاً من المركبات $ر^{ك}_{ل م ن}$ يمكن إيجاد كمية ممتدة أخرى نحصل على مركّباتها $ر_{ك ل}$ بجمع بعض قيم $ر^{ك}_{ل م ن}$. هذه المركّبات الجديدة $ر_{م ن}$ هي مركّبات كميــة ممتدة تدعى كميــة رايمــان- كريستوفل الممتدّة المقلّصة. وأخيراً، وانطلاقاً من $ر_{م ن}$ يمكن الحصول على كمية ر وهي عدد لامتغيّر عند تغيير الإحداثيات وهو يدعى **الانحناء السلّمي** للفضاء.

الفصل الثامن

هندسة الجاذبية

سيتم التعبير عن مبادئ النسبية العامة بشكل رياضي يسمح بالحصول على معادلات أينشتاين التي توّج بها النسبية العامة.

قوانين الطبيعة

لمتّصل الزمان- المكان أربعة أبعاد يمكن تمثيلها على إحداثيات غاوس ونربط بكل نقطة من هذا الفضاء أربعة أعداد س، ع، ص، هـ تحدّد وضعها في الزمان- المكان.

ستحل جملة إحداثيات غاوس محل جملة المقارنة الصلبة المستخدمة في النسبية الخاصة. وسيتم التعبير عن الفكرة الأساسية في مبدأ النسبية العامة بصياغة جديدة:

جمل إحداثيات غاوس كلّها متكافئة فيما يخصّ صياغة قوانين الطبيعة.

يقتضي هذا المبدأ أن تتحول المعادلات المعبّرة عن هذه القوانين إلى معادلات لها الشكل نفسه عند إجراء أي تحويل يسمح بالانتقال من إحدى جمل إحداثيات غاوس إلى جملة أخرى.

ونرى أن ذلك توسيع هامّ لمبدأ النسبية الخاصة حيث لايطلب من القوانين أن تحافظ على شكلها إلا عند تطبيق تحويل لورنتز.

رأينا أن القانون الفيزيائي القابل للصياغة باستخدام الكميّات الممتدة هو مستقل عن جمل الإحداثيات، ولذلك؛ يقتضي مبدأ النسبية العامة مايلي:

قوانين الفيزياء كلّها يجب التعبير عنها بعلاقات بين الكميّات الممتدّة.

الهندسة ترتبط بالجاذبية

وفقاً لمبدأ التكافؤ لايمكن التمييز موضعياً بين حقل تسارع وحقل جاذبية، ولكن أينشتاين سيصل إلى أبعد من ذلك بإثبات أن هندسة الزمان- المكان نفسها تتعلق بهذه الحقول. ،أخيراً سيضع مسلّمة هي أن الجاذبية والتسارع والهندسة ليست سوى شيء واحد ينظر إليه من وجهات نظر مختلفة.

١- عندما ازدهرت حقول المركّبات

لنعد إلى مثال القرص الدوّار النسبوي الذي عرضناه في الفصل السابق. إن فضاء سطح القرص الثنائي الأبعاد هو فضاء رايمان يمكن أن نحدّد عليه جملة لا على التعيين من إحداثيات غاوس وقياس المسافة العنصرية ء ف يتم إذن بدلالة المركّبات الثلاث المتمايزة ج$_{١١}$ ج$_{٢١}$ ج$_{٢٢}$ للكمية الممتدّة. ولكن حساب هذه المركّبات ممكن لأننا نعرف قياس الأطوال الذي يمكن التعبير عنه بدلالة السرعة سر وبالتالي بدلالة التسارع في كل نقطة. وهكذا يمكن إقامة مساواة بين أمثال ج$_{١١}$ ، ج$_{٢١}$، ج$_{٢٢}$ هندسية صرفة وبين مقدار تع تحريكي بصورة أساسية، وهكذا تتطابق هندسة فضاء رايمان مع التأثيرات العطالية الناتجة عن دوران القرص.

٢- حصاد حقل الجاذبية

أجرى أينشتاين المحاكمة نفسها فيما يخص الجاذبية وطابق مباشرة بين المركبات ج$_{٢١}$. . لكمية ممتدّة مقياسية وبين توابع تتعلق بكمية تميّز كل حقل جاذبية.

هذه الكمية التي نرمز لها بالرمز كن يمكن التعبير عنها بدلالة الأمثال ثا وكـ في قانون نيوتن للجاذبية ونضع كن = ثا كـ / ر حيث ر بعد مركز كتلة كـ عن نقطة

من الفراغ الذي نقيس فيه قيمة كن . هذه الكمية تدعى الكمون النيوتني أو الكمون الجذبي للكتلة كـ .

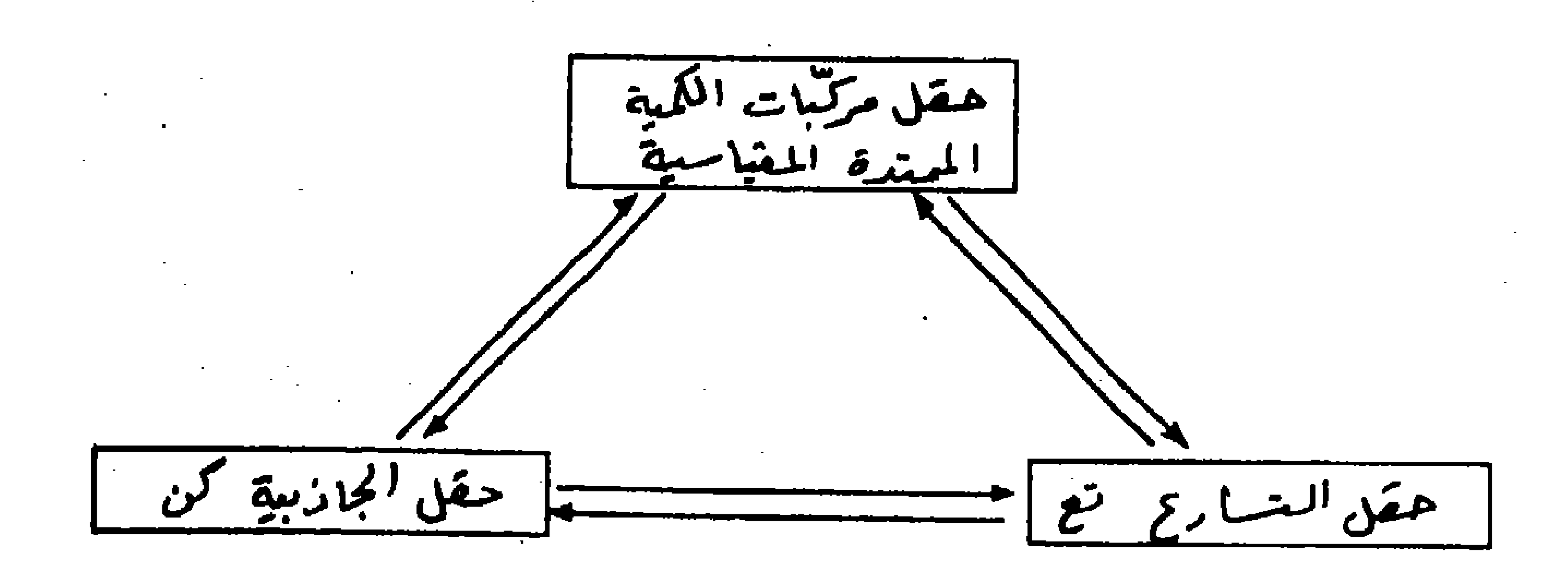
لإقرار التكافؤ بين المركّبات ج٢١ . . والكمون كن رأى أينشتاين أن المعادلات النسبوية لحركة جسيم في حقل جاذبية ضعيف يجب أن تؤول إلى العلاقات المقابلة لها وغير النسبوية في الحالة الحدّية للسرعات الصغيرة .

بحساب المسافة العنصرية ء ف بطريقتين مختلفتين نحصل على تعبيرين يؤكدان التكافؤ بين المركبات ج٢١ . . ذات المنشأ الهندسي والجاذبية الموصوفة بالكمون كن .

وهكذا تتطابق هندسة فضاء رايمان مع تأثيرات حقل الجاذبية .

٣- التطابق بين الهندسة والجاذبية

وهكذا أغلق أينشتاين المثلث المنطقي للتكافؤ بين حقل مركّبات كمية ممتدة مقياسية وحقل الجاذبية وحقل التسارع . الشكل ٨-١ يمثل هذا التكافؤ الثلاثي .



شكل ٨-١

وهو يبيّن أن هندسة المكان - الزمان الذي يحوي كتلاً جاذبة هي رايمانية بالضرورة. وفي الحقيقة لايمكن أن تكون المركّبات ج٢١ . . . ثابتة وهي الصفة التي تميّز الفضاء الإقليدي، لأن حقل الجاذبية الناتج عن كتلة ما يتغير من نقطة إلى أخرى في الفضاء وذلك بصورة مستقلة عن جملة الإحداثيات المستخدمة. ومبدأ التكافؤ بين حقلي الجاذبية والتسارع يقوى بهذا التفسير وهكذا يغلق مثلث التكافؤات على نفسه.

نذكّر مع ذلك أن هذه التكافؤات موضعية وأنها ستسمح بوضع قانون جديد للجاذبية وسيتم التعبير عنه أيضاً موضعيّاً.

٤- مصادر الانحناء الرايماني

القول إن هندسة المكان- الزمان هي رايمانية يعني القبول بوجود انحناء ما في هذا الفضاء، ولكن ما هو «مصدر» هذا الانحناء؟ إن العلاقة بين الهندسة والجاذبية تجعل تفكيرنا يتجه بصورة طبيعية إلى المادة التي باستطاعتها أن تولّد في داخلها وفي داخل الفضاء المحيط بها انحناء للزمان- المكان.

ولكننا لاننسى أن النسبية الخاصة أثبتت التكافؤ بين الكتلة والطاقة، كما أثبتت انحفاظ مقدار أساسي هو المتّجه ذو المركّبات الأربع، وهو متّجه الطاقة- الاندفاع (ص ٦١) إن هذا الكيان بأشكاله المختلفة بالإضافة إلى المادة والإشعاع هي جميعاً مصادر الجاذبية وهي بالتالي مصادر الانحناء الرايماني. وإذا أردنا الدقة نقول: إن تيار الطاقة- الاندفاع هو المصدر بالمشابهة مع التيار الكهربائي الذي هو مصدر الحقل الكهرطيسي. والطاقة- الاندفاع تقوم بدور الشحن الكهربائية.

وأخيراً نجد أن الكتل وأشكال الطاقة المختلفة تسهم كلّها في الانحناء الهندسي للزمان- المكان، وهو بصورة عامة متغيّر من نقطة إلى أخرى.

المراجع الرخوة

رأينا في النسبية الخاصة، وفي جملة مقارنة ذات إحداثيات ديكارتية س، ع، ص، ز أن الفاصل ء ف في عالم مينكوفسكي يعطى بالعلاقة :

$$ء ف^2 = ء س^2 + ء ع^2 + ء ص^2 - ض^2 ء ز^2$$

١- المقياس يصبح رخواً

في النسبية العامة لم يعد اختيار جملة المقارنة محدوداً، ويمكن أن تكون إحداثيات غاوس الثلاثة س ع ص كميات اختيارية تحدّد مواقع الأجسام في المكان، ويتم تحديد إحداثي غاوس الزماني هـ بميقاتية تشير إلى زمنه الخاص، وعندئذ يكون التعبير عن مربع الفاصل أكثر تعقيداً وهو بالشكل العام :

$$ء ف^2 = ج_{١١} ء س + ٢ج_{٢١} ء س ء ع + ٢ج_{٣١} ء س ء ص + \ldots ج_{٤٤} ء هـ^2$$

الأمثال $ج_{١١}$ . . . . هي توابع للإحداثيات المكانية س،ع ،ص وللإحداثي الزماني هـ. ويصبح التعبير عن ء ف^2 تعبيراً عن فضاء رايمان رباعي الأبعاد. ولكن التوابع $ج_{١١}$ . . . ليست معروفة مسبقاً لأنها الآن محدّدة بالصفات الفيزيائية للجملة المدروسة.

وفي القرص الدوّار تتعلــق هذه التوابع بســرعــة الدوران وببعد كل نقطة عن مركزه. وفي مجموعة كتل تكون التوابع $ج_{١١}$ . . متعلقة بشدّة الجاذبية في كل نقطة من الفراغ .

وفي الحالة العامة لحقل جاذبية أو حقل تسارع متغير نجد أن مقياس الفضاء لايخرج فقط عن كونه إقليدياً، فهو يتغير أيضاً مع الزمن، وبتعبير آخر تكون النسب بين المسافات الهندسية المختلفة متغيرة.

وهكذا يتغيّر مفهوم جملة المقارنة تغيّراً جوهرياً عما كان عليه سابقاً في

النسبية الخاصة. ففي النسبية الخاصة كنا نعني بجملة المقارنة مجموعة صلبة من المستقيمات، أو بصورة عامة مجموعة من الأجسام الساكنة بالنسبة إلى بعضها بعضاً. أما في حقل الجاذبية المتغير فلاتوجد مثل هذه الجمل من الأجسام. ولتحديد موقع نقطة في فضاء رباعي الأبعاد تحديداً تاماً نحتاج إلى عدد لامتناه من الأجسام التي تملأ الفضاء، إنها المادة بمختلف أشكالها. نعرض ما قاله أينشتاين مجازاً عن جمل المقارنة.

> ولذلك نستخدم جمل مقارنة غير صلبة، وبالإضافة إلى أنها تتحرّك بمجموعها بطريقة ما، فهي أيضاً تغيّر أشكالها بطريقة ما خلال حركتها [...] هذه الجملة للمقارنة والتي يوجد ما يدعو إلى تسميتها «جملة مقارنة رخوة» تكافئ جملة إحداثيات غاوس رباعية الأبعاد [...] ومبدأ النسبية العامة يتطلب إمكان استخدام هذه «الرخويات» كلّها، والحق في استخدامها والنجاح في هذا الاستخدام لايقلان عن غيرها من جمل المقارنة لصياغة القوانين العامة للطبيعة، ويجب أن تكون القوانين بحدّ ذاتها مستقلة عن اختيار هذه الجملة الرخوة للمقارنة.

٢- الزمن يزداد رخاوة

بما أن إحداثيات غاوس لجملة مقارنة رخوة هي اختيارية، يمكن التساؤل عن كيفية تحديد المدد الزمنية الخاصة، أي المقيسة بميقاتية مثبتة بنقطة ما من الفراغ، باستخدام إحداثيات غاوس.

لنرمز بالرمز ز للزمن الخاص، ولندرس حدثين متقاربين زمنيًّا قربًا لامتناهيًا يحدثان في نقطة واحدة من الفراغ. لنرمز بالرمز ء ز للمدّة الزمنية الفاصلة بين هذين الحدثين. في هذه الحالة يكون مربع الفاصل ء $ف^٢$ بين هذين الحدثين هو:

$$-ض^2 ء ز^2 = -ج_{٤٤} ء هـ^2$$ أو

$$ء ز = \frac{1}{ض} \sqrt{ج_{٤٤}} ء هـ$$

لمعرفة الزمن بين حدثين اختياريين يحدثان في نقطة واحدة من الفراغ يكفي حساب مجموع المدد الزمنية ء ز وهكذا نحصل على الزمن الخاص الذي تقيسه ميقاتية بدلالة إحداثي غاوس الزمني هـ.

وبما أن المركّبة $ج_{٤٤}$ للكمية الممتدة المقياسية تتعلق بمتغيرات غاوس، فإن الزمن الخاص يجري بأشكال مختلفة من الفضاء داخل جملة مقارنة واحدة في النسبية العامة. وهذا يعني أن فاصل الزمن الخاص بين حدثين يقعان في نقطة ما من الفراغ، والفاصل الزمني بين حدثين متزامنين معهما في نقطة أخرى من الفضاء هما بصورة عامة مختلفان.

وذلك لأن حقل الجاذبية أو التسارع سيؤثر فيزيائياً على سير الميقاتيات. وينطبق ذلك بصورة خاصة على الساعات البيولوجية للإنسان. وإذا عدنا إلى مثال التوأمين المعروض في بحث النسبية الخاصة (ص ٤١) واللذين قام أحدهما برحلة كونية نجد أنهما لايخضعان إلى شروط فيزيائية متطابقة، وهكذا يمكن أن يعود أحد التوأمين فعلاً، ودون وجود تناقض وعمره مختلف عن عمر أخيه.

المعادلات النسبوية للجاذبية

إن التكافؤات الممثلة بالشكل ٨-١ هي مسلّمات وضعت انطلاقاً من بعض الحالات الخاصة. ولاستخراج معادلات تعطينا قانون الجاذبية الأكثر عمومية لم يكن لدى أينشتاين بالإضافة إلى هذه المسلّمات سوى الفرضيتين التاليتين.

على مسافة لا متناهية من أية مادّة أو أي إشعاع يجب أن يكون الزمان-المكان إقليدياً.

- لابد من تحقّق قانون انحفاظ الطاقة- الاندفاع المعبّر عنه بالشكل العام باستخدام الكميّات الممتدة.

ومن اللافت للنظر فعلاً أن هذين الشرطين وحدهما كانا كافيين لوضع معادلات القانون النسبوي للجاذبية.

في منطقة بعيدة بعداً لامتناهياً عن كل كتلة وعن كل طاقة يكون الزمان- المكان إقليدياً وانحناؤه معدوماً. وكمية رايمان- كريستوفل الممتدة تعطينا عندئذ المعادلات العشرين المتمايزة $ر^{ك}_{ل م ن} = ٠$، ولكن الزمان- المكان ليس خالياً بمجموعه وانعدام كمية رايمان- كريستوفل الممتدة هو حالة خاصة. ولابدّ من إيجاد علاقة أكثر عمومية تشمل العلاقة السابقة بصفتها حالة خاصة.

والمادة والطاقة من جهة أخرى هما مصدر الجاذبية ولابدّ من أن يكون لهما دور في القانون العام للجاذبية. وبصورة خاصة يجب أن يؤول هذا القانون العام إلى قانون نيوتن القديم المعروف في الجاذبية في حالة الحقول التجاذبية الضعيفة.

ويجب أن يظهر القانون المطلوب التساوي بين الصيغة التي تصف هندسة فضاءات رايمان والصيغة المعبّرة عن الخواص الفيزيائية للمادّة والطاقة ويمكن أن نلخص هذا القانون بالمطابقة:

هندسة الزمان- المكان ≡ المادة والطاقة

ولذلك يجب أن يكون للتعبيرين الرياضيين المبحوث عنهما الخواص العامة نفسها. ولكن المادة والطاقة تتصفان بخاصة انحفاظ الكمية الممتدة للطاقة- الاندفاع والتي نرمز لمركبّاتها بالرمز $ط_{م ن}$.

وبعد عدد من المحاولات، عثر أينشتاين على كمية ممتدّة هندسية تحقق رياضياً خاصة الانحفاظ، وهي الكمية الممتدة $ر_{م ن} - (\frac{١}{٢}) ج_{م ن} ر$، حيث $ر_{م ن}$ هو كمية رايمان- كريستوفل الممتدة المقلّصة و ر الانحناء الكلي لفضاء رايمان. وهو كمية ممتدّة عندما تنعدم تعطينا الحالة الخاصة $ر^{ك}_{ل م ن} = ٠$

وكون هاتين الكميتين المتدّتين، وهما الطاقة- الاندفاع من جهة والانحناء الهندسي من جهة أخرى تتمتّعان بخاصة الانحفاظ لايعني بالضرورة أنهما متناسبتان. ولكن مبدأ التكافؤ بين الهندسة والخواص الفيزيائية يشير إلى ضرورة تطابق الطاقة- الاندفاع مع كمية ممتدّة هندسية تتصف أيضاً بخاصة الانحفاظ. وهكذا سلّم أينشتاين وبجرأة كبيرة مرّة أخرى بوجود تناسب بين هاتين الكميتين الممتدّتين. ويمكن الحصول على عامل التناسب بإثبات أن معادلات الكميات الممتدّة، تؤول في حالة حقول الجاذبية الضعيفة إلى قانون نيوتن. وأخيراً حصل أينشتاين على مجموعة المعادلات:

$$\text{ح}_{\text{م ن}} - \frac{1}{2}\,\text{ج}_{\text{م ن}}\,\text{ح} = \frac{8\,\pi\,\text{ث}}{\text{ض}^{4}}\,\text{ط}_{\text{م ن}}$$

وهي معادلات أينشتاين أو معادلات حقل الجاذبية التي توّجت النسبية العامة وتوّجت أبحاث أينشتاين.

عدد هذه المعادلات ١٦ ونحصل عليها بإعطاء الدليلين م،ن القيم ١، ٢، ٣، ٤ ويختصر عددها إلى ١٠ معادلات مستقلة بسبب تناظر الكميات الممتدّة.

$$\text{ح}_{\text{م ن}} = \text{ح}_{\text{ن م}}\ ،\ \text{ط}_{\text{م ن}} = \text{ط}_{\text{ن م}}$$

إن حل هذه المعادلات، بتطبيقها على حالات خاصة، سيسمح عند مقابلتها مع النتائج التجريبية بالتحقق من صحة الفرضيات التي بنيت عليها هذه المعادلات.

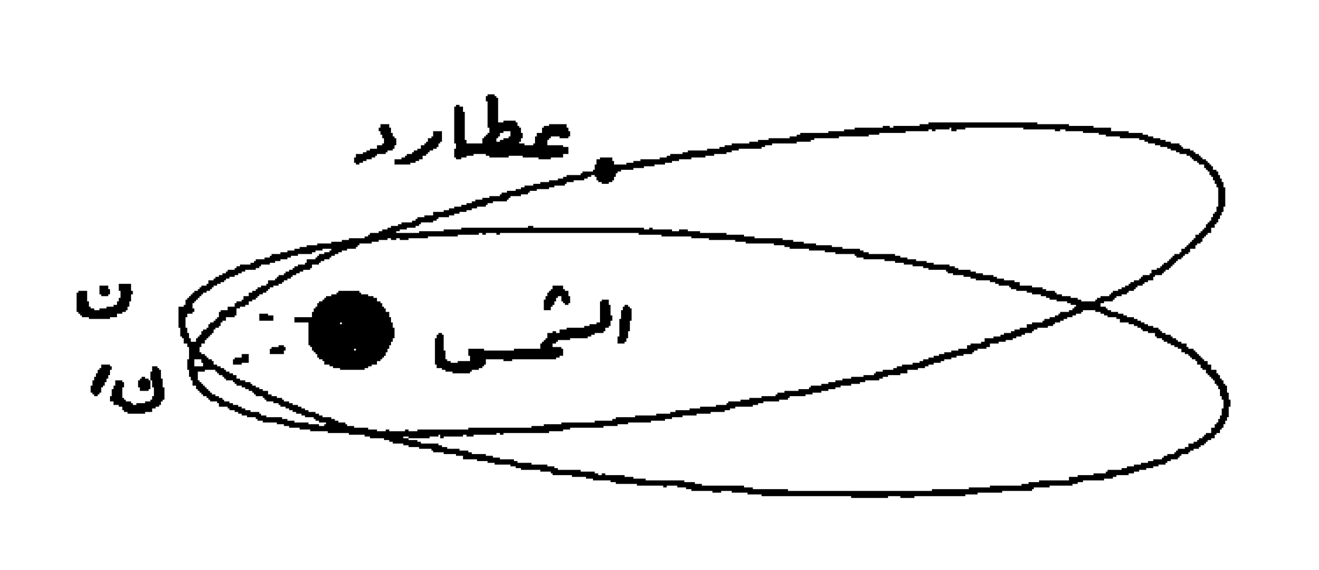
اختبارات تقليدية للنسبية العامة

على كل نظرية جديدة أن تكون قادرة على التنبؤ على الأقل، أي قادرة على الدلالة على تجارب للتأكّد من صحتها. وقد اقترح أينشتاين نفسه ثلاثة اختبارات للنسبية العامة: حساب المسارات الدقيقة للكواكب السيّارة،[1] وانحراف الأشعة الضوئية الصادرة عن النجوم بفعل الشمس، وتغير أطوال موجات الضوء بتأثير حقل جاذبية.

والنتائـــج الممتازة لهذه الاختبـــارات جعلت هذه النظرية الجديدة تفرض نفسها بسرعة.

١- عطارد يلهو على قطعه الناقص

لايكفي قانون نيوتن في الجاذبة بمفرده لتفسير عدم استقرار الكواكب في مساراتها حول الشمس. وبدلاً من أن يحافظ كل كوكب على مسار ثابت نجده يتبع قطعاً ناقصاً يدور ببطء في مستواه (شكل ٨-٢) ونجد أن نقطة الحضيض ن وهي الأقرب إلى الشمس تتحرك ببطء شديد خلال قرن. وبالنسبة إلى كوكب عطارد وهو الأقرب إلى الشمس والتباعد المركزي لمداره كبير جداً نجد أن الانزياح القرني لنقطة الحضيض كبير نسبيّاً.



شكل ٨-٢

في القرن التاسع عشر وضع «أوربان لوفرييه» (١٨١١- ١٨٧٧) نظرية مدار عطارد استناداً إلى تأثير الكواكب الأخرى و«لوفرييه» هو من تنبأ بالحساب بوجود كوكب نبتون الذي تم اكتشافه فيما بعد. لاحظ «لوفرييه» وجود اختلاف بين المشاهدات الفلكية والحسابات التي أجريت استناداً إلى نظرية نيوتن. وانتقال حضيض مدار عطارد أظهر اختلافاً صغيراً قدره ٩, ٤٢ ثانية قوسية كل قرن وبقي ذلك دون تفسير.

ولكن نظرية النسبية العامة سمحت بحساب المدارات المناسبة والحصول على الانتقال القرني الصحيح لحضيض مدار عطارد. ولذلك يمكن الحصول على حقل الجاذبية حول الشمس بحلّ معادلات أينشتاين خارج المادّة وهي

$$ر_{م ن} - \frac{١}{٢} ج_{م ن} ر = ٠$$

توصّل ك. شفارتشايلد عام ١٩١٦ إلى حل هذه المجموعة من المعادلات بفرض أن الشمس كتلة كروية لاتدور حول نفسها. وحصل على التعبيرات الصحيحة لمركّبات الكمية الممتدة المقياسية ج م ن التي تعرّف فضاء رايمان الذي يفرضه وجود الشمس. تسمح المركّبات ج م ن بعد ذلك بكتابة معادلة خط جيوديزي في فضاء رايمان يوافق المسار الزمان المكاني لكوكب.

والحساب يعطي فعلاً انتقالاالحضيض مدار عطارد يختلف بمقدار ٤٣ ثانية قوسية عما تتوقّعه نظرية نيوتن. وأينشتاين الذي كان قبل ذلك قد أجرى حساباً تقريبياً قال إنه أحس بأكبر صدمة في حياته يوم ١٨ تشرين الثاني من عام ١٩١٥، وهو اليوم الذي وجد فيه هذه النتيجة المتفقة مع الأرصاد الفلكية.

٢- إشعاعات نجمية ضعيفة تبهر الجمهور

النتيجة المتعلقة بعطارد لم تكن تنبّؤاً حقيقيّاً لأن خروجها عن نظرية نيوتن كان معروفاً. ولكن انحراف الأشعة الضوئية الصادرة عن النجوم بفعل الشمس لم يجر قياسه سابقاً. وإثبات وجود هذا الانحراف للضوء النجمي الضعيف سيبهر الرأي العام ويزيد من شهرة أينشتاين.

ومع ذلك فالظاهرة المطلوب قياسها صغيرة جداً. والشعاع الضوئي الذي يمر بجوار الشمس مباشرة سينحرف بمقدار ١,٧٥ ثانية قوسية عن المستقيم الذي كان سيسير عليه لولا وجود الشمس.

ولايمكن إجراء هذا الاختبار إلا على النجوم الموجودة في الجوار الظاهري للشمس. وبسبب وهج الشمس لايمكن إجراء القياس إلا عند الكسوف التام للشمس. والمقارنة بين صورة ضوئية ملتقطة خلال الكسوف مع صورة أخرى للمنطقة نفسها من السماء ولكنها ملتقطة قبل ستة أشهر عندما تكون الشمس في وضع تقابل مع وضعها خلال الكسوف بالنسبة إلى الأرض، هذه المقارنة تسمح بتحديد انحراف الإشعاعات النجمية.

كان هناك كسوف متوقع يوم ٢٩ أيار ١٩١٩، وسيكون تامًا في جزيرة برينسبه الصغيرة بجوار ساحل إفريقياالغربي. التقط الفلكي الشهير السير أرثر إدينغتون صوراً ضوئية بالتلسكوب. ، وعلى رغم الغيوم استطاع لحسن الحظ رؤية بعض النجوم. والقياسات أكدّت صحة القيمة النظرية لانحراف الأشعة.

٣- مسبارات الفضاء تؤكّد

فيما بعد، وبعد تطوير تقنيات الراديو ازدادت الدقة ولم تعد هناك حاجة لانتظار الكسوف. في عام ١٩٦٤ اقترح شابيرو إرسال موجة كهرطيسية باتجاه الشمس ثم باتجاه عطارد عندما يكون محجوباً خلف الشمس بالنسبة إلى الأرض. تنحرف الموجة أولاً بتأثير الشمس ثم تنعكس على عطارد ويعود جزء ضئيل منها نحو الأرض بعد أن يمرّ مرّة أخرى بجوار الشمس.

هذه الأمواج التي تمر بجوار الشمس تتأخر ٢٠٠ ميكروثانية تقريباً بالمقارنة مع اجتياز هذا المسار نفسه دون مرورها بجوار الشمس. هذا التأخر ناتج عن تأثير جاذبية الشمس على سرعة الموجة.

هذه التجربة التي اقترحها شابيرو تم إجراؤها عام ١٩٦٨ وأكّدت صحة التوقعات النظرية بدقة ٢٠٪ تقريباً. وازدادت دقة هذا النوع من التجارب باستخدام مسبارات الفضاء. والمركبة التي وضعت عام ١٩٧٦ على سطح المريخ سمحت بالتأكد من صحة توقّعات النسبية العامة بخطأ لايتجاوز ١ ,٠ ٪.

٤- السراب الناتج عن الجاذبية

بما أن كل كتلة تحرف الضوء فإن أية مجرّة قد تحرف الأشعة الضوئية الصادرة عن منبع ضوئي موجود خلفها بالنسبة إلى الأرض. والمشاهد الموجود على الأرض سيرى سراباً مؤلفاً من عدّة صور للمنبع حيث يبدو الضوء صادراً من عدد من الاتجاهات المختلفة. تدعى هذه الظاهر سراب الجاذبية، وقد تمّ التحقق منها أول مرّة عام ١٩٧٩ .

ويختلف عدد صور المنبع باختلاف أشكال الأجسام التي تصدر الضوء والأجسام التي تحرفه مما يثير الشك في كونها صادرة عن منبع واحد، ولكنّ التطابق التام تقريباً بين طيوف الضوء الصادر عن الصور المختلفة يؤكد أنها كلها صادرة عن منبع واحد.

٥- الانزياح التجاذبي لتردّد موجة

عندما تصدر ذرة موجة تردّدها ن فإن هذه الموجة ستنتشر وفق خطوط جيوديزية للزمان- المكان الذي يحدّده حقل جاذبية. والمستقبِل الموجود على مسافة ما من الذرة سيقيس تردّداً نَ مختلفاً عن ن. دراسة هذا الانزياح التجاذبي بين هذين التردّدين ممكنة ضمن إطار تقريبي.

يمكن الحصول على تقريب جيّد لهذا التغير في التردّد بدراسة تغير طاقة فوتون ط= هـ ن داخل حقل جاذبية. طاقته الحركية طح تكافىء وفقاً للنسبية الخاصة كتلة عطالية ك= هـ ن / ض^{٢} لنفرض أنها تساوي أيضاً كتلة تجاذبية مماثلة كما هي الحال في الكتل المادّية.

إذا كان المرسل الذري موجوداً على سطح الأرض والمستقبِل (الممتص) على ارتفاع (ع) فإن كتلة الفوتون تكتسب طاقة كامنة ك ج ع = هـ ن ج ع / ض^{٢} عند انتقالها من المرسل إلى المستقبل وبالمقابل يفقد النوتون طاقة حركية هـ نَ = - هـ ن ج ع / ض٢ وبحساب الفرق بين طاقته عند صدوره من المرسل وطاقته عند وصوله إلى المستقبل نجد

$$\text{ن} - \text{نَ} = \frac{\text{ن ج ع}}{\text{ض}^{٢}}$$

هذ الفرق صغير جداً ويحتاج إلى إصدار خطوط طيفية دقيقة جداً لإثبات ظاهرة كهذه. وبعد إعدادات دقيقة جداً تم إيجاد قيمة تقريبية لاتختلف أكثر من ٥٪ عن النتيجة النظرية المحسوبة وفقاً للعلاقة السابقة.

وهكذا أظهرت الاختبارات، بدقّة تزداد باستمرار، صحة النسبية العامّة.

وبعد تردّد طويل أصبحت الآن مقبولة بصفتها النظرية النموذجية للجاذبية.

اختبارات على النجوم

بعض الأجرام السماوية تصلح لإجراء اختبارات أخرى على الجاذبية العامة ومنها النجوم النابضة، فالتوافق اللافت للنظر بين حساب طاقة أمواج الجاذبية الصادرة عنها والمعطيات التجريبية كان إثباتاً دقيقاً جداً لنظرية أينشتاين.

١- أمواج الجاذبية

تشير معادلات أينشتاين إلى وجود إشعاعات جاذبية تصدر عن الكتل المتحركة. ينتشر هذا الإشعاع على شكل موجة أو اضطراب يغيّر من هندسة الزمان- المكان.

يمكن لكل حادثة فيزيائية إلى حدّ ما، وعلى درجات متفاوتةأن تكون مصدراً لإشعاع كهذا ولاتوجد في الحقيقة مادّة معتدلة فيما يخصّ الجاذبية، ولكن الانهيار التجاذبي لنجم أو حتى حركة كوكب حول الشمس سيكونان مصدراً لأمواج الجاذبية.

ولكن سعة هذه الأمواج ضعيفةجداً. ومع أن البحث عنها متواصل منذ أربعين سنة لم يمكن حتى الآن الكشف مباشرة عن مثل هذه الأمواج. ولكن الكتلة التي تولّد موجة جاذبية تفقد طاقة، وحساب هذه الطاقة يسمح بالتحقق بصورة غير مباشرة من فرضية وجود مثل هذه الأمواج، وبعض النجوم ساعدت بذلك على اختبار الجاذبية العامة بدقّة كبير. ومنها النجوم النابضة.

٢- منارات الزمان- المكان

عند التقط الفلكيون ولأول مرّة في عام ١٩٦٧ نبضات راديوية ذات تردّد منتظم تماماً قادمة من الفضاء النجمي ربّما يكون قد خطر لهم اكتشفوا وجود

حضارة خارج الكرة الأرضية ولكنهم كانوا في الحقيقة قد اكتشفوا أول نجم نابض يرسل أمواجاً راديوية داخل مجرّتنا. وبعد ذلك تم إحصاء ٦٠ نجم نابض تقريباً في درب التبّانة.

النجم النابض هو نجم نتروني ذو كثافة مرتفعة إلى درجة خارقة من رتبة مئة مليون طن في السنتمتر المكعب[1]. وقطر النجم النابض هو من رتبة عشرات الكيلومترت فقط.

محور الدوران
أمواج راديوية
أمواج راديوية
نجم

شكل ٨-٣

هذا الحجم الصغير وهذه الكثافة الكبيرة يساعدانه على الدوران بسرعة هائلة دون أن ينفجر بفعل القوّة النابذة. وأقصر دور تم رصده لهذا الدوران هو ١,٥ ميلي ثانية وهو للنجم النابض PSR ١٩٣٧ + ٢١.

يمكن تشبيه النجم النابض بمولد كهربائي، يولّد خلال دورانه حقلاً كهربائياً تزيد قوته المحركة عن ألف مليار فولط، وهذا الحقل ينتزع الجزيئات المشحونة من قطبي النجم. هذه الجزيئات المتسارعة تولّد بثّاً راديويّاً مؤلفاً من حزمتين مخروطيتين ضيقتين رأساهما هما قطبا النجم النابض (شكل ٨-٣) وتدوران معه. إنهما أشبه بمنارة راديوية تمسح أمواجها الفضاء وإذا صادف أن كانت الأرض على مسار إحدى الحزمتين فإن التلسكوب الراديوي يستطيع كشفها ويستقبل عندئذ سلسلة من النبضات المنتظمة ذات تردّد تابع لسرعة دوران النجم النابض.

منذ عام ١٩٧٤ تمّ اكتشاف نجوم نابضة لكل منها شريك يدور حوله وسمّيت

---

(١) نذكّر بأن الذرات على الأرض مكوّنة بمعظمها من الفراغ. وحقل الجاذبية السائد داخل نجم نابض شديد جداً يضغط النترونات والبروتونات والإلكترونات معاً لتتحول إلى مائع من النترونات.

النجوم النابضة الثنائية. وكل منها مؤلف من نجمين نترونيين على مدار ذي تباعد مركز كبير ولهما دور (زمن دوران) يبلغ عشر ساعات تقريباً وأحد النجمين هو نجم نابض يمكن رصده.

إن مجموعة كهذه ستفقد باستمرار طاقة مؤلفة من أمواج جاذبية أمكن التأكد منها بتناقص الدور المداري. وقياس هذا التغيّر يتوافق بدقة كبيرة مع الحساب الناتج عن نظرية النسبية العامة. وهو إذن اختبار جديد ودقيق جداً.

وكما رأينا فيما يتعلق بانتقال نقطة حضيض كوكب عطارد فإن القياسات التي أجريت على نجم نابض ثنائي سمحت باكتشاف انزياح حضيض مدار رفيق النجم النابض. وهذا الانزياح كبير جداً ولايقارن بالانزياح في أحد كواكب المجموعة الشمسية. لتتذكر أن انزياح حضيض مدار عطارد هو ٤٣ ثانية قوسية كل قرن وانزياح الحضيض في النجم النابض الثنائي PSR ١٩١٣+١٦ يساوي ٤,٢٢ درجة كل سنة. وهكذا أمكن اختبار أحد التأثيرات النسبوية الأخرى بنجاح وبدقة.

الفصل التاسع

علـم الكـون الـنسـبـوي

أدّت النسبية العامة إلى إعادة النظر في دراسة الكون بمجمله.

هل الكون محدود أم لا محدود؟ ما هو شكله؟ متى بدأ الكون، وكيف بدأ؟ إنها أسئلة كثيرة شغلت أذهان البشر منذ وجودهم دون أن يستطيعوا الإجابة عنها.

وحتى بداية القرن العشرين لم يكن الفلكيون أو الفلاسفة يشكّون في مفهوم الكون الثابت الذي تتناثر فيه النجوم. تغيّرت هذه الصورة البسيطة تغيّراً كبيراً بفعل حلول معادلات أينشتاين التي تفرض وجود كون رايماني متمدّد. ولكن لنتذكر أولاً بعض الأفكار حول علوم الكون السابقة للنسبية.

علوم الكون قبل النسبية

قبل اكتشاف النظارة الفلكية في نهاية القرن السادس عشر لم يكن لدى الإنسان سوى عينيه لتأمّل السماء، وكانت فكرته عن الكون محدودة.

ومن مشاهدة البشر لحركة الشمس والنجوم استنتجوا بالبداهة أن كل شيء يدور حول الأرض: وهكذا فرض أحد نماذج علم الكون نفسه: الأرض هي مركز الكون. ولم يكن الكون في نظر أفلاطون سوى كرة تتعلق بها النجوم والكواكب وهذه الكرة تدور بانتظام. ولكن النجوم كانت ثابتة بالنسبة إلى بعضها بعضاً، أما الكواكب فهي تغيّر مواقعها بالنسبة إلى النجوم، ولتفسير هذه الحركة الظاهرة

للكواكب أضاف أودوكسوس (- ٤٠٦ ، - ٣٥٥) عدداً من الكرات البلورية المتمركزة حول الأرض، وكل كرة تحمل أحد الكواكب. أما النجوم فهي مثبتة على الكرة الخارجية التي تحدّ الكون. وبعد ذلك زاد أرسطو من تعقيد هذه الكرات.

ورؤية كوبرنيك للكون بقيت متأثرة بأفكار أرسطو، ومع أنه تخلّى عن فكرة كون الأرض مركزاً للكون إلا أنه احتفظ بفكرة كرة أودوكسوس الخارجية. ولكن غاليلة فسّر درب التبّانة بأنه تناثر للنجوم في الفضاء. وقال على لسان سالفاتي في الحوارات مع سمبيشو.

والآن يا سمبيشو، ماذا نفعل بالنجوم الثوابت؟ هل ننشرها في الفضاء اللامتناهي على مسافات مختلفة أم نضعها على سطح كروي ذي مركز محدّد.

ومع نظرية نيوتن في الجاذبية بدأ علم الكون بالارتكاز على مبادئ علمية. تساءل نيوتن: هل الكون محدود أم غير محدود؟ وخطر له أن مادّة الكون في حال تبعثرها ضمن مجال محدود ستتجاذب جزيئاتها وتتجمّع في كتلة وحيدة، ولذلك مال نيوتن إلى فكرة الكون اللامتناهي:

أما إذا كانت المادة مبعثرة في كون لامتناه فإنها لن تستطيع أبداً أن تتجمّع في كتلة وحيدة بل ستتجمع في عدد لامتناه من الكتل الكبيرة المتباعدة جداً. ويمكن أن تكون الشمس والنجوم قد نشأت بهذه الطريقة.

وهكذا تحولت مسألة ثبات الكون إلى مسألة جوهرية بعد قانون الجاذبية العامة. وليبقى الكون متوازناً لابد من وجود قوّة تعاكس الجاذبية. كيف يستطيع الكون مقاومة الانهيار الناتج عن الجاذبية ؟ ستجيب النسبية العامة عن هذا السؤال جواباً لم يكن متوقّعاً.



شكل ٩-١

بقي الكون لدى كوبرنيك محدوداً بكرة تحوي النجوم الثابتة على سطحها. ولكن غاليلة تساءل عما يوجد خلف هذه الكرة (صورة مستوحاة من أحد نقوش القرن الخامس عشر)

الكون المتمدّد

حلول معادلات أينشتاين كانت مفاجأة كبيرة له. كانت هذه المعادلات تقتضي أن يكون الكون إما في حالة تمدّد أو في حالة تقلّص. وفي عام ١٩١٦ لم يخطر ذلك لأحد حتى لأينشتاين نفسه.

١- أكبر أخطاء أينشتاين

بما أن هندسة رايمان تصف بنية الزمان- المكان فلابد من تمثيل الكون بفضاء

رايماني. فوجئ أينشتاين عندما اكتشف أن معادلاته التي تصف فضاءً رايمانياً تقتضي أن يكون انحناء الكون متغيّراً مع الزمن.

لم تكن لدى أينشتاين ثقة كافية بمعادلاته ليعلن أن الكون ليس ساكناً. أعاد النظر في المعادلات ولاحظ أن من الممكن من الناحية الرياضية إضافة حدّ سمّاه الثابت الكوني يمثل قوّة تدافع قادرة على مواجهة الجاذبية العامة. وهكذا تتوازن قوتا التجاذب والتدافع. وهكذا حصل أينشتاين على نموذج ساكن الكون.

وفيما بعد تحدّث هو نفسه عن إدخال هذا الثابت الكوني واعترف بأنه كان أكبر خطأ في حياته. وبإضافته فاتته فرصة التنبؤ المثير بتمدّد الكون.

٢- فريدمان ينقذ فكرة التمدّد

في عام ١٩٢٢، برهن عالم رياضيات وأرصاد جوية روسي هو ألكسندر فريدمان أن معادلات أينشتاين المحوّرة تقبل، بالإضافة إلى الحل السكوني، حلولاً تعبّر عن أكوان ذات انحناء متغير مع الزمن. أرسل فريدمان نتائج حساباته إلى أينشتاين الذي ظن في البداية أن فريدمان أخطأ. ولكن أينشتاين خفّف فوراً من اعتداده بنفسه، واعترف بأنه كونه السكوني هو في حالة توازن غير مستقر وأن باستطاعته فعلاً أن يتمدّد أو يتقلّص عند حدوث أدنى اضطراب.

وهكذا يعود الفضل في التنبؤ بوجود كون غير ساكن إلى فريدمان. وبقيت حساباته مرجعاً حتى بعد ٨٠ سنة. ومع الأسف مات فريدمان عام ١٩٢٥ بسبب مضاعفات صعوده في منطاد إلى ارتفاع كبير. وبقي نموذجه الكوني مجهولاً على نطاق واسع إلى أن أخرجته التجربة من النسيان ولم يتح له أن يعرف الشهرة التي نالها بعد سنوات طويلة.

٣- أكوام المجرّات تتباعد

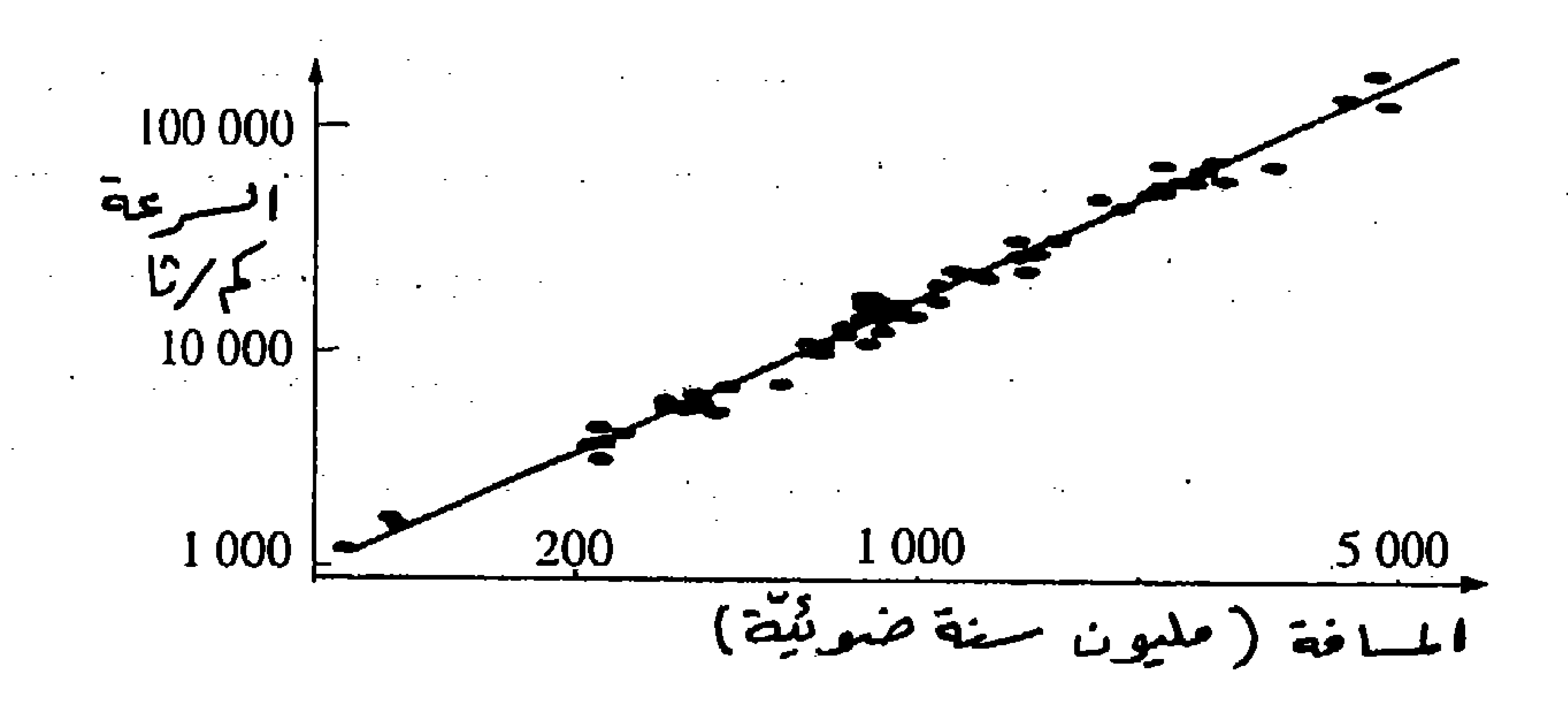
يعود الفضل إلى الفلكي إدوين هبل (١٨٨٩ - ١٩٥٣) في التحقق التجريبي من تمدّد الكون. استخدم تلسكوباً عالي الأداء بالنسبة إلى عصره لأن التي تتباعد

ليست النجوم، أو حتى المجرّات، بل ركامات المجرّات التي يحوي كل منها مئات آلاف المجرّات هي التي تتباعد.

أما داخل كل ركام فإن المجرّات تتحرك حركات خاصة تمكّنها من التقارب فيما بينها. وهكذا فإن مؤشّرات تمدّد الكون ليست المجرّات نفسها بل ركامات المجرّات. يحدث التمدد بمقياس هائل. تحوي المجرة مابين مليار ومئة مليار نجم. وركام، مثل ركام السنبلة «فيرغو» يحوي أكثر من ٢٥٠٠ مجرّة.

درس «هبل» الإشعاع الصادر عن المجرّات لتحديد سرعة ابتعادها. يمكن تحليل هذا الإشعاع إلى خطوط طيفية لها أطوال موجات قابلة للقياس ولكنّ الخطوط الطيفية الصادرة عن الركامات تكون مزاحة نحو الأحمر بالمقارنة عن الخطوط الصادرة عن منبع ساكن. إنه مفعول دوبلر - فيزو الذي يثبت أن الركامات كلّها تبتعد.

ويسمح مفعول دوبلر فيزو بحساب سرعة ابتعاد الركام بالنسبة إلى الأرض. بمقارنة قيم هذه السرعات مع أبعاد الركامات فرض هبل أن هذين المقدارين متناسبان فيما بينهما، وكلما زاد بعد المجرّة زادت سرعة ابتعادها. وذلك هو **قانون هبل** وثابت التناسب بين السرعة والمسافة يدعى **ثابت هبل**.



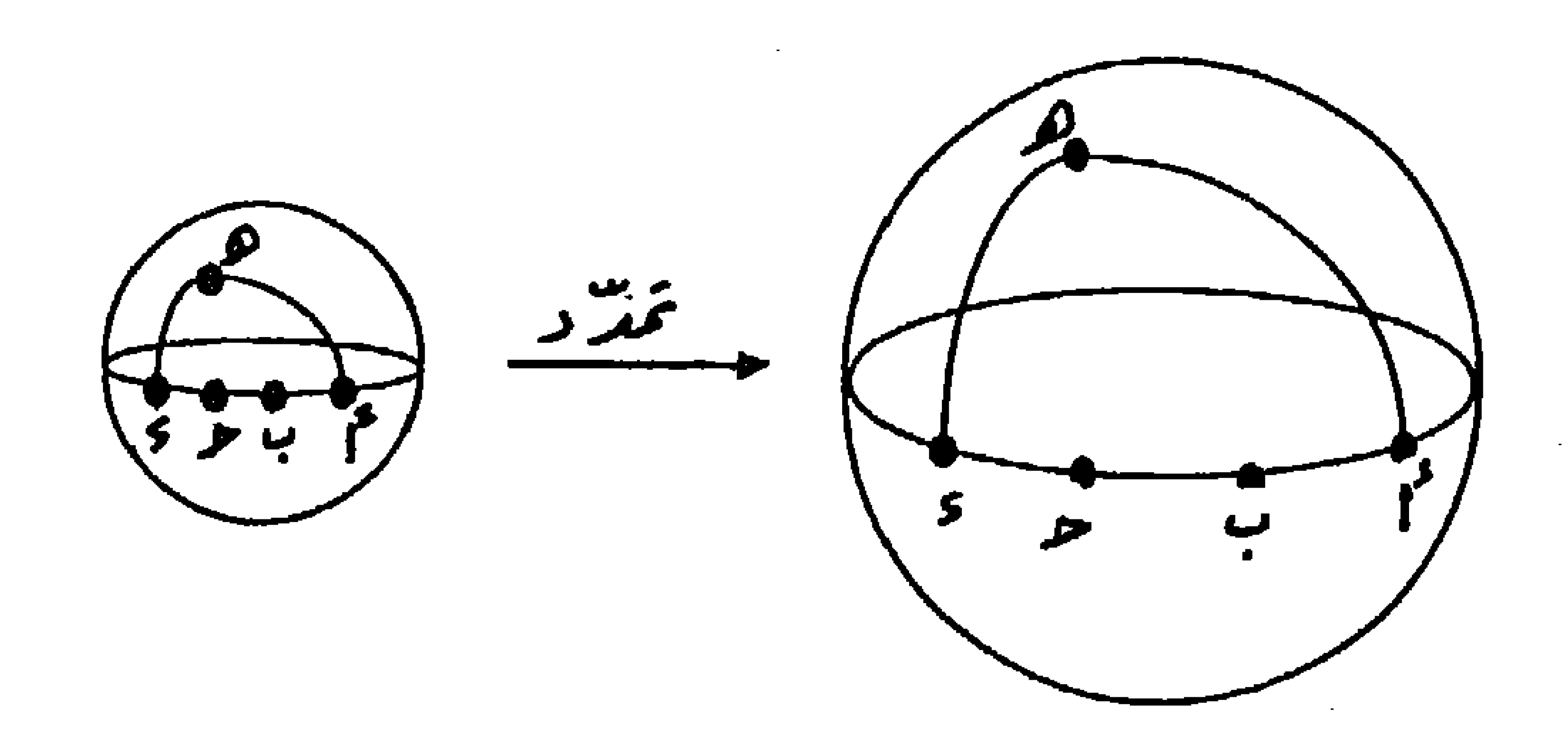
شكل ٩-٢

يظهر الشكل ٩-٢ بعض القيم التجريبية الحديثة التي توضح قانون هبل، والمجرّات الأكثر بعداً والموجودة على مسافة تقارب خمسة مليارات سنة ضوئية تبتعد بسرعات هائلة من رتبة ثلث سرعة الضوء. نذكّر بأن السنة الضوئية هي المسافة التي يجتازها جسم خلال سنة إذا سار بسرعة الضوء.

٤- الفضاء يتمدّد

هل نحن إذن في مركز الكون لتبتعد ركامات المجرات كلّها عنا؟ **عن أرضنا** ؟ لإدراك أن الحالة ليست كذلك يكفي إعطاء فكرة مبسّطة عن الكون المتمدّد. لنتصوّر كوناً ثنائي الأبعاد مكوّناً من كرة مطاطية (شكل ٩-٣) حيث نمثل ركامات المجرّات بقصاصات ورقية ملصقة على الكرة. عندما ننفخ الكرة لاتغيّر القصاصات الورقية مساحاتها ولكن المسافات فيما بينها تزداد. لنراقب بضع قصاصات على هذا السطح المتمدّد: النقاط كلّها تتباعد عن بعضها بعضاً في وقت واحد لاتمييز لواحدة عن الأخرى.

وبالإضافة إلى ذلك، يمكن التحقق بسهولة من قانون «هبل» . تزداد سرعة تباعد النقاط عن بعضها بعضاً كلما كانت أكثر تباعداً . لنفرض في البداية أن النقاط أ، ب، جـ، د في الشكل ٩-٣ كانت موزعة على مسافات متساوية كل منها ١سم وأن هذه المسافة بعد التمدد صارت ٣ سم. إن المسافة بين أ، د زادت من ٣سم إلى ٩سم بينما المسافة بين ب، جـ زادت فقط من ١ إلى ٣ سم والنقطتان اللتان كانتا في البداية أكثر تباعداً ابتعدتا مسافة أكبر، أي بسرعة أكبر.



شكل ٩-٣

من الصعب نقل مثل هذه الصورة الثنائية الأبعاد إلى الزمان- المكان المنحني الرباعي الأبعاد لكوننا . . ولكن يكفي أن نلاحظ أنه لايوجد مركز للتمدّد على سطح الكرة. وبداية تمدّد الكون ليست انفجاراً حدث في نقطة محدّدة بدقة داخل الفضاء. لأن الكون هو الفضاء كلّه. وهو لايتمدّد ضمن فضاء خارج عنه.

خيار بين ثلاثة أكوان

منذ القرن التاسع عشر فتحت هندسة رايمان آفاقاً جديدة على مفهوم الكون. وهذا ماذكّر به أينشتاين في إحدى محاضراته في جامعة برنستون عام ١٩٢١ :

> **قبل النظرية النسبية نوقش احتمال أن تكون هندسة الكون بمجموعه غير إقليدية. وبفضل النظرية النسبية دخل هذا النقاش مرحلة جديدة، إذ وفقاً لهذه النظرية لاتكون هندسة الأجسام مستقلّة عنها، بل مرتبطة بتوزّع الكتل.**

في السابق، وفي الهندسة الإقليدية يمكن أن نتصور الكون لا نهائياً وبالتالي ليست له حدود أو منتهياً، مثل تصوّر أفلاطون، وعندئذ تكون له حدود.

وفي هندسة رايمان صار من الممكن تصور كون منته وفي الوقت نفسه ليست

له حـــدود، وتلك هي مثلاً حالـــة الكائنات ثنائيـــة الأبعـــاد التي تتحرك على ســـطح كرة. ويوجد مقابل رايمـــاني ثلاثـــي الأبعاد لهذا العالـــم الكـــروي ثنائي الأبعـــاد. ولهـــذا الفضاء حجم منتـــه ونقاطـــه كلها متـــكافئـــة، وهـــو يحدّ كرة فائقة ضـــمن فضـــاء رباعي الأبعاد، كما يحـــدّ الســـطح الكـــروي كـــرة عاديـــة.

إنّ حلول فريدمان لمعادلات أينشتاين الكونية تعطي ثلاثة نماذج من الأكوان. أحدها ليست له حدود ولكن حجمه منته وبذلك يختلف عن النموذجين الآخرين اللذين يمثّلان التمدد المكاني - الزماني اللامتناهي.

١- المبدأ الكوني

عندما تكون إحدى المســائل كمسألة الكون الحقيقي شديدة التعقيد، نبدأ بتبسيطها إلى أقصى حدّ عندما نحاول حلّها. وهذا مافعله أينشتاين عندما فرض أن الكون متجانـــس ومتماثل الاتجاهات بالمقياس الكبير جداً. وهذا ما يدعي **المبدأ الكوني**. وفي الحقيقة يبدو أن توزّع ركـــامات المجرّات هو نفســـه في مختلف الاتجـاهات. وهذا مـا يقـــرّه علمـاء الكون المعـاصـرون. يمكن تمثيل ركـامـات المجـــرّات بجـزيئـــات تكوّن مائعـاً كـونيـاً يســـلك ســـلوك غـاز لايوجـد تأثير متبادل بين جزيئاته.

إذا قبلنا الآن أن معادلات أينشـــتاين هي التي تصف الكون يمكن أن نحاول حلّ هذه المعـادلات الشـــهيرة. ولكنـــنا لن نستطيع متـابعـــة الحـــساب حتى النهايـــة إذا لـم نعرف المعادلة التي تربط كثـافـــة «غـاز ركـــام المجـرّات» بضغطه. يتميّز الكون الحالي بوجود مادة ذات ضغط ضعيف جداً وســطيّـاً ولذلك يمكن باســـتخدام تقريب جيّد جداً أن نفـــرض أنّ ضغـــط هذا الغاز معدوم وهذا ما فعله فريدمان.

٢- الكون الدوري

حصل فريدمان على ثلاثة حلول مختلفة ولكل منها انحناء سلّمي ح (ز) متغير مع الزمن، وهذا مايشير إليه تمدّد الكون.

في النموذج المسمّى الناقصي أو الدوري تكون السرعة الابتدائية للتمدّد بطيئة إلى حدّ ما وهكذا، وبعد مرحلة من التمدد، تسبب قوى الجاذبية تقلّص الكون بعد زمن طويل من رتبة مئة مليار سنة. ونحصل على نموذج التطور الكوني الدوري كما يظهر في الشكل ٩-٤.

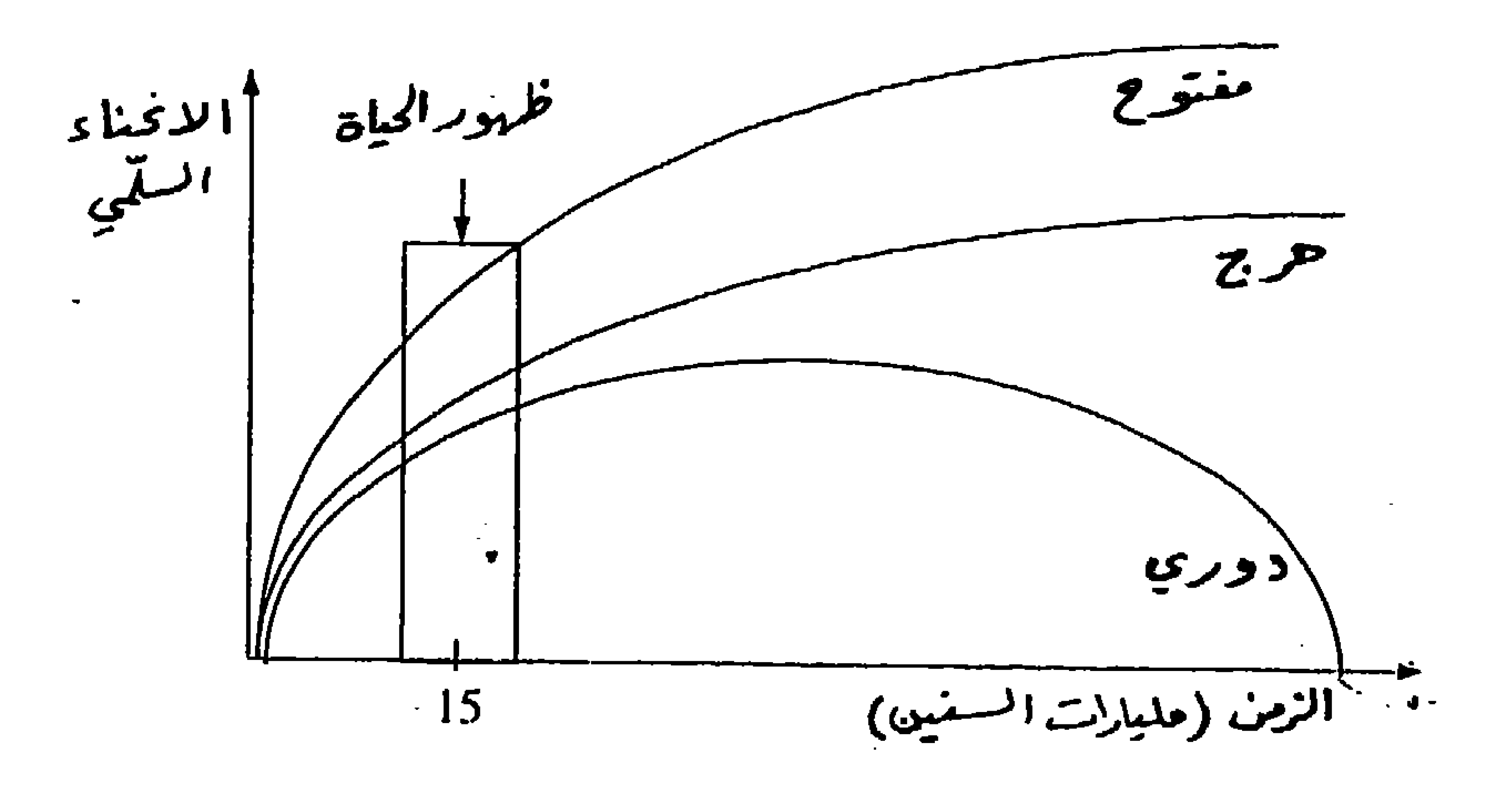
إذا كنا في كون كهذا فنحن الآن في إحدى مراحل التمدّد. وفيما بعد ستتقارب مجرّات الكون كلّها نحو الانسحاق النهائي قبل أن يبدأ تمدّد جديد.

يمكن أن نعرف العمر الحالي لهذا النموذج الكوني منذ بدء تمدّده استناداً إلى قيمة ثابت «هبل» ولكنّ هذا الثابت غير معروف بدقّة كبيرة. وهكذا نحصل على عمر يتراوح بين ١٠ و ١٥ مليار سنة. سيتقلّص هذا الكون بعد زمن يتراوح بين ٨٠ و١٠٠ مليار سنة. وما زال الزمن طويلاً إذن قبل مرحلة الانسحاق.

٣- الكون المفتوح

في هذا الحل الثاني تكون السرعة الابتدائية لتمدد الكون أكبر منها في نموذج الكون الدوري. وقوّة التمدّد تتغلّب على الجاذبية ويتمدّد الكون بشكل متواصل. وعمر كون كهذا هو أيضاً ما بين ١٠ مليارات و١٥ مليار سنة.

وعندما يتمدّد هذا الكون يبرد تدريجيّاً وتزداد الأنتروبيا، أي حالة التشويش داخله. مما يؤدي إلى موته الحراري.



شكل ٩-٤

ما زال الكـــون الحالــي في حالة مرتّبـــة جداً على رغم زيادة الأنتروبيا خلال ما يقـــارب ١٥ مليار ســـنة من التـمـدّد. ويبدو ذلك غريباً، إذ يجب أن تكون الحالـــة الابتدائية شـــديدة الترتيب ليكـــون كـذلك. وســـيصل هذا النموذج أيضاً إلى مســـتقبل بعيد خـال من الحيـــاة لأن الكـــون ســـيصل إلى برودة مطلـــقة.

٤- الكون «الحرج»

في الكون الدوري تكون سرعة التـمـدّد الابتـدائيـة صغـيـرة، وبذلك تتـاح الفـرصة للجـاذبيـة لإعادة ضـغط الكون بعـد زمن ما. أمـا في الكون المفـتوح فـإن الجاذبية لاتستطيع مقاومة قوّة التمدّد. وبين هذين النموذجين، يوجد الكون الحرج حيث تكفي سرعة التـمدّد الابتدائية لموازنة قوة الجاذبية بالضبط. وهي السـرعة الحـرجة للتـمدّد. ونقول عن الكون في هذه الحالة: إنه حرج ويتـمـدّد باستمرار وعمره من رتبة كبر النموذجين السابقين.

ولكن انحناءه الفضائي معدوم وهكذا نعود إلى كوننا الإقليدي ذي الأبعاد

الثلاثة. ولكن انحناءه السلّمي متغيّر مع الزمن. وتمدّد هذا الكون يقوده أيضاً إلى موته الحراري.

٥- أي كون نختار؟

هذه النماذج الثلاثة لا تترك سوى خيارين نهائيين لمستقبل الحياة: إما بالانسحاق أو الموت بالبرودة. ولكن معطيات الفيزياء الكونية الحالية لاتسمح باختيار طريقة تنفيذ حكم الإعدام، مما يفسح المجال أمام البشرية لاختراع سيناريوهات أخرى.

نحن عاجزون الآن عن اختيار أسلوب موتنا ولكن اللافت للنظر هو أن نشوء الحياة محدّد تماماً بالسرعة الابتدائية للتمدّد. وهذه النماذج الثلاثة تستلزم في الحقيقة وجود سرعة ابتدائية قريبة جداً من السرعة الحرجة تسمح بنشوء الحياة، أو بالشكل الذي نعرفه على الأقل.

والسبب بسيط. فإذا تمدّد الكون بسرعة في البداية ستعجز الجاذبية عن ضم التجمعات الموضعية للمادة أي النجوم والكواكب التابعة لها والتي تسمح بظهور الحياة بعد زمن طويل إلى حدّ كاف. وبالعكس، إذا كانت السرعة الابتدائية صغيرة جداً فإن الكون سيتقلّص قبل نشوء الظروف المناسبة لظهور الحياة.

وهكذا يجب أن يبقى الكون قريباً من الحالة الحرجة كما يبين الشكل ٩-٤ (حيث رسمت المنحنيات متباعدة للإيضاح). وتلك هي الحالة فعلاً وإلا لما كنا هنا للحديث عنها.

نشوء الكون

من اللافت للنظر أن فريدمان استنتج نماذجه من معادلات أينشتاين قبل أن يتحقق «هبل» من تمدّد الكون.

ومرّة أخرى برهنت الفيزياء النظرية على قدرتها التنبُّئيّة الفائقة، كما حدث سابقاً عندما تنبأت حسابات لوفرييه باكتشاف كوكب نبتون. وكذلك عندما تنبأ مكسويل، استناداً إلى معادلاته بوجود أمواج كهرطيسية تنتشر بسرعة الضوء وهذا التنبّؤ حث «هاينريش هرتز» على البحث عن هذه الأمواج المجهولة التي أطلق عليها فيما بعد اسم الأمواج الهرتزية، والتي هي الآن عماد اتصالاتنا الإذاعية بما فيها الإنترنت. كما ذكرنا كيف ظهرت الجسيمات المضادة من معادلة ديراك.

نعود الآن إلى نماذج فريدمان التي تفرض أن الكون قد بدأ بشكل مكثف جداً ليبدأ التمدّد. وفي هذه الحالة الابتدائية يجب أن تكون كثافة الكون كبيرة إلى حدّ لايمكن تصديقه. يطلق على هذه الحالة اسم **التفرّد الابتدائي**، وهي لغز مازال العلماء النظريون يحاولون كشفه. واستناداً إلى سرعة التمدّد الحالية وإلى التباطؤ التدريجي يجب أن تكون حالة التفرّد الابتدائي قد وجدت منذ ١٥ مليار سنة تقريباً. وانطلاقاً منها بدأ التمدد الابتدائي للكون الذي يطلق عليه التعبير الشائع:

البيغ بانغ.

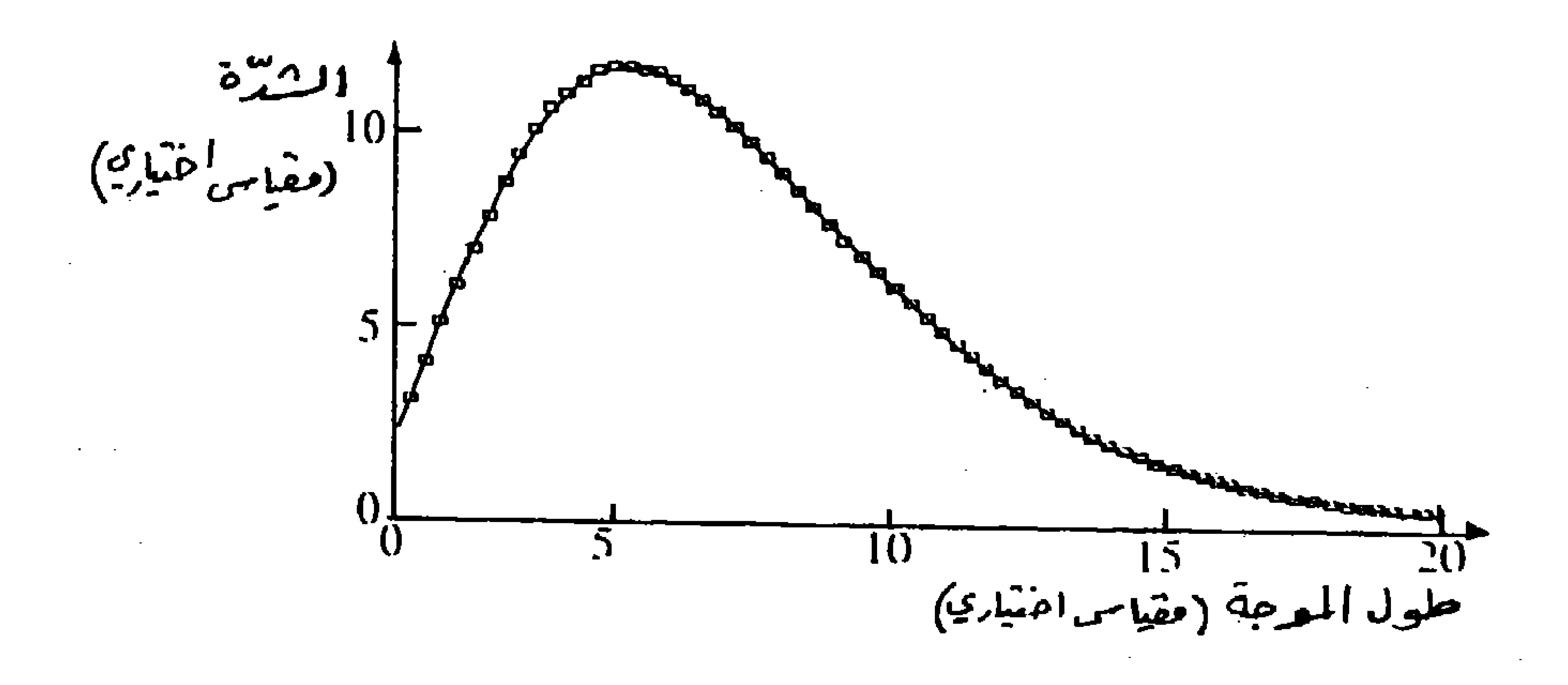
١- إشعاع قديم العهد

لم يأخذ علماء الكون نموذج البيغ بانغ على محمل الجدّ إلا بدءاً من عام ١٩٦٢ بعد اكتشاف الإشعاع القديم العهد والمتبقي من بدايات الكون.

كان جورج غاموف (١٩٠٤- ١٩٦٨) أول من وضع في الأربعينيات فرضية وجود إشعاع حراري متبقٍّ صادر عن الانفجار الأول للكون. حاول مع اثنين من طلابه هما رالف ألفر وروبرت هرمان وضع تصوّر للمراحل الأولى لتمدّد الكون.

وإذا كان الكون في البدايـــة في حالة كثيفة جداً، وفي درجة حرارة مرتفعة جداً فلابد من وجود إشعاع متبقٍ منتـــشر في الكون بكامله. ولابدّ من أن يكون هذا الإشعاع قد برد خلال التمدد، ويجب أن يوجد في درجة حرارة لا ترتفع إلا ببضع درجات عن درجة الصفر المطلق وهي -٢٧٣ سلسيوس. ولكن لم ينظر آنذاك بجديـــة إلى محاولات تصور بداية التمـــدّد وبقيت تنبؤاتهم طي النسيان وبالمصادفـــة، كان مهندسان أمريكيان. هما: أرنو بنزياس وروبرت ويلسن يعايران هوائياً إذاعياً لمتابعة قمر صناعي عندما فوجئا بالتقاط إشـــعاع أمواج ميكروية تأتي بصورة غير منتظمة من مختلف الاتجاهات. وهكذا اكتشفا، لحساب مخابر «بل» التي لاشـــك في أنها لاتهتم كثيراً بعلم الكون، الإشـعاع الحراري الشهير المتبقي من بدايات الكون. وهذا الإشعاع يعادل إشـعاع جسم أسود في درجـــة حـرارة قـريبـــة من الصفـــر المطلق، وهي ٢,٧٤ كـالفن. واكتـــشاف هذا الإشعاع المتبقي أكد نظرية التمدد الحـــراري الابتدائي وكان بداية دراسات معمّقة للبيغ بانغ.

والدراسات اللاحقة التي أجراها عام ١٩٨٩ قمر صناعي تابع لـ «ناسا» هو مستكشف الخلفية الكونية أثبتت أن هذا الإشعاع هو طيف الجسم الأسود الأكثر كمالاً مما تمّ تسجيله في الطبيعة. والمعطيات التجريبية توافق تماماً المنحنى النظري الذي وضعه بلانك عندما وضع أسس الفيزياء الكمومية. والشكل ٩-٥ يوضح التوافق التام بين القياسات التي أجراها القمر الصناعي والممثلة بمربعات ومنحنى بلانك الممثل بخط متصل محسوب من أجل ٢,٧٤ كالفن. والشـروط القصوى للإشعاع الابتدائي للكون هي وحدها التي تســـتطيع توليد مثل هذا الجـــسم الأسود المثالي.



شكل ٩-٥

٢- علم الكون الكمومي

لم تعتمد النظريات التقليدية المتعلقة بالبيغ بانغ على النسبية العامة بل على المعلومات المتعلقة بالجسيمات العنصرية، ولكن هذه المعلومات لم تتوصل إلى تحديدالشروط الابتدائية لنشوء الكون.

ولكن تطوّر الفيزياء منذ أكثر من سبعين سنة حتى الآن أثبت أننا نعيش في كون كمومي تدخل قوانينه الفيزيائية الأساسية كلها ضمن إطار الميكانيك الكمومي. وهكذا يمكن إيجاد نظرية كمومية لبداية الكون. ولكن الطموح لإيجاد مثل هذه النظرية محفوف بالمخاطر إذ لاتوجد حتى الآن نظرية كمومية للجاذبية.

لجعل الميكانيك الكمومي قابلاً للتطبيق في مجال علم الكون لابد بوجه

خاص من أن يكون تعريف الزمن المستخدم متوافقًا مع اتجاه حركة الزمن الذي يستلزم جريان الزمن في اتجاه وحيد.

وضع جون ويلر وبرايس دي ويت معادلة أساسية لعلم الكون الكمومي انطلاقًا من نظرية الجاذبية الناتجة عن الجاذبية العامة. ونحصل على تابع موجة للكون، ولكن هذا التابع لم يصل إلى تنبؤات تبين الشروط الابتدائية لنشوء الكون.

ملحق رياضي

ميقاتية فيثاغورس

في الشكل ٢-٢ نجد أن المسار م ن ب = م ن + ن ب واستناداً إلى نظرية فيثاغورس نجد أن:

$$\text{م ن ب} = ٢\sqrt{\text{م ن}^{٢}} = ٢\sqrt{\text{ل}^{٢} + \text{سر}^{٢}\,\Delta\text{ز}^{٢} / ٤} \qquad (١)$$

ولكن المسار م ن ب قد تم اجتيازه بسرعة الضوء ض خلال زمن Δ ز إذن

م ن ب = ض Δ ز لنكتب المساواة بين هذين التعبيرين ونجد

$$\Delta\text{ز}^{٢}\left[١ - \frac{\text{سر}^{٢}}{\text{ض}^{٢}}\right] = \frac{٤\,\text{ل}^{٢}}{\text{ض}^{٢}} \qquad (٢)$$

في المرجع جَ يكون زمن الذهاب والعودة Δ زَ = ٢ ل/ ض . نعوض في العلاقة (٢) ٤ ل^{٢}/ ض^{٢} بما يساويها أي Δ زَ^{٢} ونجد

$$\Delta\text{ز} = \frac{١}{\sqrt{١ - \text{سر}^{٢} / \text{ض}^{٢}}}\,\Delta\text{زَ} \qquad \Delta\text{ز} = \gamma\,(\text{سر})\,\Delta\text{زَ}$$

تحويل لورنتز الخاص

إن إطار المحاكمة لاستخراج تحويل لورنتز الخاص هو دائماً جملتا مقارنة ج (م س ع ص) و جَ (مَ سَ عَ صَ) تنتقل إحداهما بالنسبة إلى الأخرى بحركة انسحابية منتظمة بسرعة سر وفقاً للمحور م س (شكل ١-١). جملتا المقارنة مزوّدتان بميقاتيتين متماثلتين ونختار مبدأ الزمن بحيث يكون ز= زَ=٠ عندما انطباق مبدأي الإحداثيات م، مَ.

والمسألة المطروحة هي إيجاد العلاقات بين الإحداثيات س ع ص ز و سَ عَ صَ زَ بحيث يتحقّق كل من مبدأ النسبية ومبدأ ثبات سرعة الضوء.

إن تحويل غاليله هو سَ = س − سر ز. والتحويل المطلوب يجب أن يؤول إلى تحويل غاليلة عندما تكون سر صغيرة جداً بالمقارنة مع ض وأبسط علاقة خطية هي سَ = γ (سر) (س − سر ز) (١)

ولتؤول هذه العلاقة إلى تحويل غاليلة يجب أن يكون γ (سر) تابعاً لـ سر يساوي للواحد عندما سر ⟵ ووفقاً لمبدأ النسبية يكون توجيه المحاور اختيارياً وإذا عكسنا الاتجاه الأصلي نضع − س بدلاً من س، و − سَ بدلاً من سَ وفي هذه الحالة تكون السرعة −سر والتحويل (١) يصبح:

− سَ = γ (−سر) (− س + سر ز)

لنضرب طرفي المعادلة بـ(−١) نجد

سَ = γ (− سر) (س− سر ز) (٢)

بمقارنة العلاقتين (١)، (٢) نجد γ (سر) = γ (− سر)

ومن جهة أخرى يقتضي مبدأ النسبية وجود علاقة تمثّل تحولاً معاكساً للعلاقة (١) عندما تكون سرعة جَ بالنسبة إلى ج هي − سر:

س= γ (− سر) (سَ + سر ز) = γ (سر) (سَ + سر ز) (٣)

لنفرض الآن وجود ومضة ضوئية تصدر في اللحظة ز=زَ=٠ في النقطة م المنطبقة على مَ في تلك اللحظة. بعد زمن ز تكون الومضة قد اجتازت مسافة س=ض ز بالنسبة إلى المرجع ج ومسافة سَ = ض زَ بالنسبة إلى المرجع جَ. ندخل هاتين القيمتين في العلاقتين (١) و(٣) نجد ض ز = γ (ض+سر) زَ،

ض زَ = γ (ض−سر ز) (٤).

نضع المساواة بين جداء الطرفين الأيسرين والطرفين الأيمنين لهاتين المساواتين ونقسم على ز زَ نجد:

$$ض^{٢} = \gamma^{٢} (ض - سر) (ض + سر) \qquad (٥)$$

ومن العلاقة (٥) نستخرج تعبير γ (سر):

$$\gamma (سر) = \frac{١}{\sqrt{١ - سر^{٢} / ض^{٢}}} \qquad (٦)$$

وهو تابع لايتعلق إلا بالقيمة المطلقة للسرعة ويتناهى إلى الواحد عندما سر ⟵ ٠

ونحصل بسهولة على العلاقة بين الزمنين ز، زَ وبما أن ز= س/ ض فإن العلاقة (٤) وهي ض ز = γ (ض-سر) ز تعطينا عند إبدال سر ز بـ سر س / ض:

$$زَ = \gamma (ز - سر\ س / ض^{٢}) \qquad (٧)$$

وأخيراً نجد أننا نعبّر عن تحويل لورنتز الخاص بالعلاقات:

سَ = γ (سر) (س-سر ز) ، عَ=ع، صَ=ص،

$$زَ = \gamma (سر) (ز - سر\ س / ض^{٢}) \qquad (٨)$$

وفي حالة الحركة الانسحابية لجملتي مقارنة لاتتوازى محاورهما مثنى مثنى وفي حالة عدم انطباق اتجاه السرعة على أحد المحاور تعمّم هذه العلاقات وتعطي **تحويل لورنتز**.

الفهرس

صفحة

صفحة

المترجم

هاني محمد رشاد حدّاد

مكان وتاريخ الولادة: اللاذقية ١٩٣٠

إجازة ر. ف. ك. جامعة دمشق ١٩٥١

دبلوم التربية والتعليم جامعة دمشق ١٩٥١

موجّه اختصاصي للفيزياء والكيمياء ١٩٦٠- ١٩٦٤

ومدرس الفيزياء في جامعة دمشق ١٩٦٤- ١٩٩٩ .

التأليف والترجمة: ٤ كتب مقررة للتعليم الإعدادي والثانوي خلال الأعوام ١٩٥٨- ١٩٦٤

٤ كتب جامعية لتدريس الفيزياء في كلية هـ. م. ك بدمشق

كتاب جامعي لتدريس الفيزياء جامعة الجزائر (١٩٧٥)

مراجعة كتاب العلم اليوم والبارحة وغداً من منشورات وزارة الثقافة.

ترجمة كتاب الفوضى والحتمية عن اللغة الفرنسية من منشورات وزارة الثقافة.

ترجمة عشرات المقالات العلمية والتقنية

والتربوية عن اللغتين الفرنسية والإنكليزية والمنشورة في مجلات المعلم العربي والمهندس العربي والطاقة والتنمية.

ترجمة أكثر من (٥٠٠) برنامج علمي ووثائقي تلفزيوني عن اللغة الإنكليزية.

اللغة الأم: العربية.

لغات أخرى: الفرنسية والإنكليزية.

الطبعة الأولى / ٢٠٠٥

عدد الطبع ١٠٠٠ نسخة

أحدثت النظرية النسبية، الخاصة أولاً ثم العامّة، انقلاباً كبيراً في الفكر العلمي. وكانت نتائجها حاسمة، سواء أكان ذلك في معرفة الذرّة أم في معرفة الكون.

هذا العرض لمفاهيم ألبرت آينشتاين ونتائجها موجّه إلى جمهور واسع جداً، وقد أتاح لنا ذلك استعراض الأفكار التي بدأت مع غاليله ونيوتن، وانتهت باكتشاف المادّة المضادة وتمدّد الكون.



سعر النسخة داخل القطر ٨٥ ل.س في الأقطار العربية مايعادل ١٧٠ ل.س
٢٠٠٥